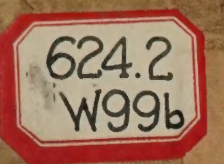


Beitrag zur Spannungsuntersuchung an Knotenblechen eiserner Fachwerke

VON DER

EIDGENÖSSISCHEN TECHN. HOCHSCHULE IN ZÜRICH

ZUR

ERLANGUNG DER WÜRDE EINES
DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

GENEHMIGTE

DISSERTATIONSARBEIT

283

Von

Dipl.-Ing. Theophil Wyss

Referent: Prof. A. Rohn
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. h. c. F. Schüle

Berlin 1923
Druck: A. W. Schade, Berlin

Beitrag zur Spannungsuntersuchung an Knotenblechen eiserner Fachwerke

VON DER

EIDGENÖSSISCHEN TECHN. HOCHSCHULE IN ZÜRICH

ZUR

ERLANGUNG DER WÜRDE EINES
DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

GENEHMIGTE

DISSERTATIONSARBEIT

283

Von

Dipl.-Ing. Theophil Wyss

Referent: Prof. A. Rohn
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. h. c. F. Schüle

In Dankbarkeit gewidmet

dem

Verein schweizerischer Brückenbauanstalten

vom Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

Textblätter.

Tafeln des Anhanges.

Quellennachweis.

1. W. Gehler, Nebenspannungen eiserner Fachwerkbrücken. Ernst & Sohn, 1910.
2. Rühl, Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Heft 221.
3. Preuß, Spannungsverteilung, Forschungsheft Nr. 126.
4. Findeisen, Beanspruchungen in Laschen, Forschungsheft Nr. 229.
5. R. Baumann, Beanspruchung der Bleche beim Nieten, Forschungsheft Nr. 252.
6. M. Rudeloff, Versuche im Eisenbau, Heft 1 und 3, Ausgabe A. Springer 1915 und 1921.
7. G. Schaper, Eiserne Brücken. Ernst & Sohn, 1914.
8. A. und L. Föppl, Drang und Zwang. Oldenbourg, 1920.
9. O. Mohr, Abhandlungen aus dem Gebiete der technischen Mechanik. Ernst & Sohn, 1914.
10. H. Lorenz, Fließkurven fester Körper in Zeitschrift für technische Physik Nr. 10, Jahrgang 21.

Vorwort.

Angeregt wurde diese Arbeit von meinem hochverehrten ehemaligen Lehrer, Herrn Prof. Rohn. Die für die Versuche notwendigen Probekörper, Probeträger und Apparate wurden mir vom Verein schweizerischer Brückenbauanstalten kostenlos zur Verfügung gestellt, dem ich in tiefer Dankbarkeit diese vorliegende Arbeit widme. Die Versuche am Probekörper (Vorversuche) fanden in der Festigkeitsanstalt der Eidg. techn. Hochschule statt, wozu Herr Prof. Dr.-Ing. h. c. Schüle die freundliche Erlaubnis gab, während die Versuche mit dem Probeträger bei der Fa. Cd. Zschokke Eisenbau Döttingen durchgeführt wurden. Für die Vorversuche und zum Teil auch für die Hauptversuche wurden die Meßapparate von der Generaldirektion der schweizerischen Bundesbahnen und vom Eisenbahndepartement in dankenswerter Weise zur Verfügung gestellt.

Anläßlich dieser vielfachen Unterstützungen, die mir zuteil geworden sind, und ohne die es mir nicht möglich gewesen wäre, die Versuche in diesem Umfange durchzuführen, möchte ich allen beteiligten Herren danken, insbesondere Herrn Direktor Rôs, Herrn Prof. Rohn, Herrn Prof. Dr.-Ing. h. c. Schüle, Herrn Brückeningenieur Bühler, Herrn Kontrollingenieur Hübner und Herrn Dipl.-Ing. Meyer.

Ich bin mir bewußt, daß diese Arbeit nur ein kleines Glied in der Kette der technisch-wissenschaftlichen Arbeiten sein wird, dem durch das Gelingen dieser Versuche neue, bessere Glieder folgen werden. Dem einer Doktordissertation entsprechenden Umfange nach konnte nicht das ganze Versuchsmaterial, das innerhalb fast zweier Jahre gesammelt und verarbeitet wurde, ausführlich besprochen werden; die Veröffentlichung mußte vielmehr auf das Wesentlichste beschränkt werden. Um weiteren Versuchen dieser Art ausführliche Grundlagen zu geben, sind die gesamten Messungen und theoretischen Ableitungen dem Archiv der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich übergeben worden; die Titel der einzelnen Untersuchungen sind am Ende dieser Druckschrift aufgeführt.

Es freut mich, Herrn Professor Rohn diese von ihm schon in früheren Jahren geplante Arbeit als ehemaliger Schüler überreichen zu dürfen.

Olten (Schweiz), im September 1921. Th. Wyss.

I. Einleitung.

Die genaue Kenntnis der Spannungszustände in den Knotenblechen eiserner Fachwerke liegt bis jetzt noch völlig im Unklaren. Die heute übliche Formgebung, konstruktive Ausbildung und die Berechnung der Knotenbleche beruhen nur auf vereinfachten Annahmen. Es liegt somit im besonderen Bedürfnis der Praxis, die Frage der Knotenblechspannungen zu lösen zu versuchen. Durch rein mathe matische Untersuchungen würde es nicht möglich sein, ans Ziel zu gelangen, da den verschiedenen Bedingungen und Umständen nicht genügend Rechnung getragen werden kann. Nur der Weg der Versuche in Verbindung mit der Theorie bietet Aussicht auf Erfolg.

Die vorliegende Arbeit hat somit den Zweck, durch viele planmäßig vorgenommene Messungen die Beanspruchungen eiserner Fachwerke, insbesondere der Knotenbleche, innerhalb der Elastizitätsgrenze zu klären, um für die Dimensionierung und Gestaltung derselben feste Grundlagen zu schaffen. Versuche über Spannungsuntersuchungen an Fachwerken sind in großem Maßstabe vom Verein schweizerischer Brückenbauanstalten an bestehenden Bauwerken durchgeführt worden, deren Ergebnisse noch verarbeitet werden.[1]) Da sich jedoch bei bestehenden Bauwerken vielfach Umstände geltend machen, die den Zusammenhang der Meßergebnisse verschleiern, so ist es zweckmäßig, an besonders hergestellten Probekörpern, die unter möglichster Vermeidung störender Einflüsse konstruiert worden sind, sich Klarheit zu verschaffen. Solch klärende Versuche sind jedoch immer an bestimmte Grenzen gebunden, indem aus der Fülle der Konstruktionen nur bestimmte Bauarten von Knotenblechen herausgegriffen werden können, die in der Praxis am meisten vorkommen. Ferner kann die Belastungsart nur als Annäherung an die Wirklichkeit betrachtet werden. Es wird daher erforderlich sein, die aus diesen Versuchen gewonnenen Ergebnisse auf die großen Bauwerke unter Berücksichtigung der veränderten Verhältnisse zu übertragen, was besonders beim Versuchsträger infolge der großen konzentrierten Last und der kleinen Stützweite der Fall ist.

Die Untersuchungen lassen sich in drei Hauptabschnitte teilen:

a) Ermittlung der Spannungsverteilung an Knotenblechen vermittels Spannungsmessern und Vergleich der Ergebnisse mit den heutigen Berechnungsverfahren. Einfluß der Knotenblechform auf die Spannungsverteilung.

b) Bestimmung des Kraftabbaues in den Anschlußstäben des Knotenbleches.

c) Untersuchung der durch die Knotenbleche erzeugten Nebenspannungen im Fachwerk.

Diese drei Ziele sind erforderlich, um volle Klarheit über das Arbeiten der Knotenbleche zu erhalten und um die bisherigen Berechnungsverfahren auf ihre Zuverlässigkeit prüfen zu können.

Die Versuche wurden an drei verschiedenen Knotenblechen einwandiger Trägerquerschnitte durchgeführt:

1) Knotenblech bei senkrecht an die Gurtung anschließendem Stab.

2) Gewöhnliches Knotenblech im Strebenfachwerk.

3) Gewöhnliches Knotenblech im Pfostenfachwerk.

Durch die Wahl dieser Bauarten sollte es möglich sein, auch auf ähnliche Knotenblechformen zu schließen, wodurch der Untersuchung eine gewisse allgemeine Grundlage gegeben wird.

Es wurden zunächst Vorversuche an einem besonderen Probekörper ausgeführt, um durch die Bestimmung des Dehnungsverlaufes für verschiedene Schnitte auf die zu erreichenden Möglichkeiten schließen zu können. Die Hauptversuche fanden an einem Probeträger statt, in den die zu untersuchenden Knotenbleche eingebaut wurden.

Die Versuchskörper sind so bemessen worden, daß die durch die vorgenommenen Belastungen erzeugten Spannungen möglichst innerhalb der Elastizitätsgrenze bleiben. Es handelt sich also nicht um Festigkeitsversuche, obschon es auch schon aus den sich ergebenden Ergebnissen möglich sein wird, auf die Sicherheit der einzelnen Konstruktionsteile gegen Bruch schließen zu können.

[1]) Bericht der techn. Kommission des Verbandes schweizerischer Brückenbau- und Eisenhochbaufabriken. Nebenspannungen infolge vernieteter Knotenpunktsverbindungen eiserner Fachwerkbrücken. Juni 1922.

II. Meßapparate.

An den Probekörpern wurden gemessen:

a) die Dehnungen

b) die Durchbiegungen

c) die Verdrehungen in der Hauptträgerebene.

Es mußten zu diesem Zwecke entsprechende Apparate verwendet werden, die hier kurz beschrieben werden sollen.

1. Der Okhuizen-Dehnungsmesser.

Eine eingehende planmäßige Untersuchung der Deformation bestimmter Knotenblechteile konnte erst vorgenommen werden, als Dehnungsmesser mit kleiner Meßlänge zur Verfügung standen. Diese Apparate müssen nicht nur sehr genau messen, sondern auch ohne große Schwierigkeit an beliebigen Stellen des zu untersuchenden Bauwerks befestigt werden können, und die Messungen müssen leicht ablesbar sein. Diesen Bedingungen entspricht in ausgezeichnetem Maße der Okhuizen-Dehnungsmesser, der von Brückeningenieur Bühler in der Schweiz eingeführt wurde. Er wird in Holland hergestellt und dort zu wissenschaftlichen Untersuchungen vielfach verwendet. Er besitzt nach Abb. 1 bis 3 zwei Stiele *a* und *b*, an deren unterem Ende die Schneiden *d* und *c* aus gehärtetem Stahl sitzen. Der Stiel *a* trägt außerdem die Skala *e*

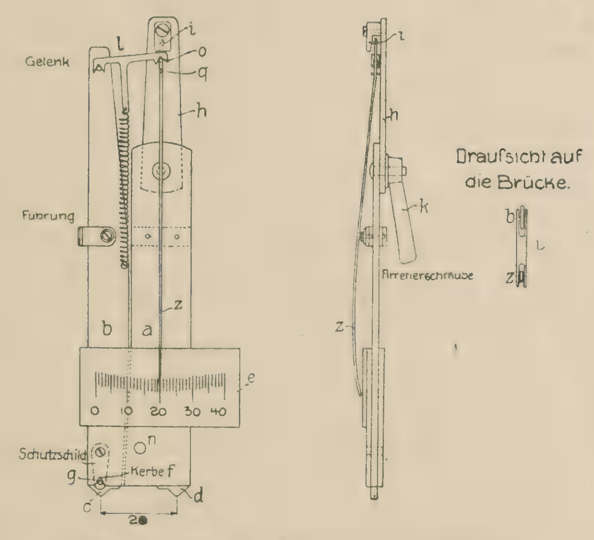


Abb. 1 bis 3. Der Okhuizen-Dehnungsmesser.

und die Einkerbungen *f*, in denen das Gelenk *g* sitzt, ferner am oberen Ende den Arm *h* mit dem Gelenk *i* des Zeigers *z*. Der Arm *h* kann durch einen Arretierhebel *k* mit dem Stiel *a* fest verbunden werden, so daß das Gelenk *i* des Zeigers *z* in fester Verbindung mit der Skala steht. Diese ist in 40 Teile geteilt. Der Stiel *b* ist unten mit dem Stiel *a* durch das Gelenk *g* verbunden. Das obere Ende verbindet eine Brücke *l* mit dem Zeiger, die durch eine Feder auf die kleinen Stahlbolzen gedrückt wird. Durch das Loch *n* im Stiel *a* können die Befestigungsmittel, wie Stahlnadel, Bügel, Fuß gesteckt werden, wodurch ein festes Anpressen der Schneiden auf das zu untersuchende Objekt ermöglicht wird. Die Abb. 4 bis 7 zeigen einzelne Befestigungsmöglichkeiten,

wobei immer auf gutes Sitzen der Schneiden zu achten ist. Diese Schneiden werden noch durch leichte Schläge auf die oberen Stielenden etwas ins Material eingetrieben, damit sie nicht rutschen. Durch die Verstellung des Hebels *h* kann dem Zeiger jede beliebige Nullstellung gegeben werden.

Wenn die Brücke auf dem Bolzen *o* des Zeigers sitzt und sich die in 20 mm Abstand befindlichen Schneiden *c* und *d* um $^3/_{100}$ mm verschieben, so

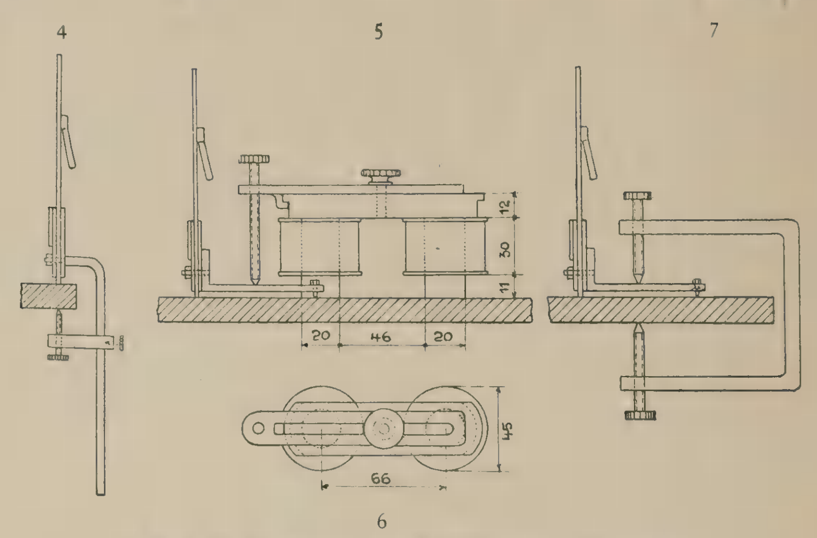


Abb. 4 bis 7. Befestigung des Okhuizen-Dehnungsmesser.

überstreicht der Zeiger *z* 33 Skalenteile. Es zeigt somit ein Skalenteil $^1/_{1100}$ mm Bewegung der Schneiden an. Da die Meßlänge 20 mm beträgt, so ist daher ein Skalenteil $\frac{1}{1100} \cdot \frac{1}{20} = \frac{1}{22000}$ der Meßlänge.

Ist die Brücke im Bolzen *q*, so ergeben $^6/_{100}$ mm einen Ausschlag von 34,5 Skalenteilen, was die Vergrößerung somit um fast die Hälfte verringert. Es ist allgemein

$$\Delta l = \sigma \frac{l}{E} \quad \text{oder} \quad \sigma = \frac{\Delta l}{l} E.$$

Für einen Skalenteil würde daher $\sigma_o = \frac{1}{22000} 2150000 = 98 \text{ kg/cm}^2$

resp. $\sigma_q = \frac{1}{11500} 2150000 = 187 \text{ kg/cm}^2$

betragen. Da es noch möglich ist, $^1/_{10}$ Skalenteil zu schätzen, so würde man somit, wenn die Brücke im Bolzen *o* ruht, 10 kg/cm² Spannung ablesen können. Im Gebrauch zeigt sich, daß man durch Uebung und Ablesen mit der Lupe soweit kommen kann, und es kann der mittlere Fehler des Apparates auf ± 15 kg/cm² gesetzt werden, wobei ± 5 kg/cm² auf Rechnung der Reibung in den Gelenken und ± 10 kg/cm² auf Rechnung der Schätzung zu rechnen sind. Da dieser Fehler mehr oder weniger unveränderlich ist, so werden kleine Spannungsergebnisse prozentual mehr beeinflußt als große. Der Ablesefehler kann sich noch vergrößern, wenn mittelbar durch Spiegel oder von der Seite abgelesen werden muß. Eine Beeinflussung der Meßergebnisse kann auch durch die Befestigungsart erfolgen, indem z. B. lange Bügel mit Klemmschrauben entsprechend aufzuhängen sind, damit ihr Eigengewicht das Verschieben der

Schneiden nicht beeinflußt. Da das ganze System auf Hebelübersetzungen beruht, so übt die Temperaturänderung keinen merklichen Einfluß auf die Meßergebnisse aus.

Während des Meßvorganges ist leicht auf den zu prüfenden Körper zu klopfen, damit die Reibungskräfte im Meßgeräte besser überwunden werden.

Da es sich in unserem Falle um Dehnungsmessungen handelt, wurde der Dehnungsbeiwert eines jeden Apparates von Zeit zu Zeit für einen Skalenteil im Amt für Maß und Gewicht in Bern festgestellt. Zu diesem Zweck wurde eine Meßmaschine der Société Genevoise d'Instruments de Physique verwendet und die Meßergebnisse dieser Maschine mit denen der Okhuizen-Messer verglichen. Bei diesen Prüfungen herrschte immer die Temperatur von + 15° C. Die Dehnungsbeiwerte wurden an verschiedenen Stellen der Skala ermittelt und hieraus ein Mittelwert berechnet.

Verwendet wurden 4 Apparate mit etwa 660 facher Uebersetzung, zu denen später 4 weitere Apparate neuester Bauart mit etwa 900 facher Uebersetzung hinzukamen. Insgesamt wurden damit über 8000 Messungen zu je 4 Wiederholungen ausgeführt.

Es ist mir sehr wohl bekannt, daß die Spiegelapparate neuester Bauart größere Genauigkeiten aufweisen, ihre Anwendung wäre jedoch in vielen Fällen infolge ungenügender Befestigungs- und Ablesemöglichkeiten vereitelt worden. Die durch Okhuizen-Messer erzielte Genauigkeit ist als genügend zu betrachten, wenn man berücksichtigt, daß die bedeutenden Einflüsse der Nietdeformation und die Spannungen an den Lochrändern noch viel weniger genau erfaßt werden können.

2. Die Durchbiegungsmesser von Stoppany.

Diese Durchbiegungsmesser erlauben $^{1}/_{100}$ mm genaue Ablesungen. Die Uebersetzung ist in einer Dose untergebracht. Für 1 mm Durchbiegung macht der Zeiger eine volle Umdrehung. Die Zahl der Umdrehungen kann am Druckstift abgelesen werden, an dem die Millimeter markiert sind. Eine besondere Befestigungsvorrichtung mit Kugelgelenken erlaubt, diesen Apparaten jede beliebige Stellung zu geben.

3. Die Klinometer.

Zur Messung der Drehwinkel wurden anfangs Klinometer mit mittlerem Fehler von 4″ verwendet. Später wurden solche neuester Konstruktion mit 1″ mittlerem Fehler benutzt.

Es soll noch erwähnt werden, daß versucht wurde, die Deformation durch Photographieren eines auf das Versuchstück aufgezeichneten Netzes in zwei verschiedenen Belastungszuständen zu ermitteln. Es entstehen dann auf der Platte zwei gegeneinander verschobene Netzbilder, aus deren Verschiebung die Deformation bestimmt werden kann. Die Genauigkeit dieses Verfahrens war für eine weitere Verwendung nicht groß genug.

III. Theoretische Grundlagen der Versuche.

1. Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannung.

Wir haben es bei den Eisenbauwerken mit Konstruktionselementen von geringer Dicke zu tun, was besonders bei Knotenblechen der Fall ist. Im allgemeinen Belastungsfall deformiert sich eine unendlich kleine Kugel zu einem Ellipsoid, ebenso bildet die allgemeine Spannungsverteilung für Schnitte um

einen Punkt ein Ellipsoid. An der Blechoberfläche zerfallen die Deformations- und Spannungsellipsoide zu Ellipsen, sofern keine örtlichen äußeren Kräfte auf die betreffenden Stellen einwirken. Im allgemeinen treten bei Knotenblechen keine oder nur kleine Schubspannungen senkrecht zur Blechoberfläche auf; infolgedessen sind die im Innern entstehenden Ellipsoide sehr flach, und ihre Hauptachsen schließen mit den entsprechenden der Zerfallsfiguren an der Oberfläche nur kleine Winkel ein. Es entsteht daher kein großer Fehler, wenn auch im Innern die Deformations- und Spannungsellipsoide als Ellipsen parallel zur Blechoberfläche betrachtet werden. Dadurch kann als Knotenblechelement ein unendlich kleiner kreisrunder Zylinder betrachtet werden, dessen Höhe gleich der Blechdicke ist. Hiervon sind die Deformationen der Deckflächen meßbar. Wird das Ebenbleiben der Querschnitte bei der Deformation als richtig angesehen, so entsteht durch die gerade Verbindung der sich entsprechenden Deformationspunkte der Deckflächen im allgemeinsten Fall ein Regelkörper als Deformationsfigur. Das gleiche ist der Fall mit dem Spannungszylinder. Es können dadurch Spannungs- und Deformationszustände im Blechinnern bei der Kenntnis dieser Zustände an beiden Oberflächen bestimmt werden, indem durch die Regelkörper an den betreffenden Stellen Schnitte parallel der Oberfläche gelegt werden.

Der Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannung soll durch folgende allgemeine Sätze festgelegt werden, wobei auf den mathematischen Nachweis verzichtet werden muß.

a) ein unendlich kleiner Kreis deformiert sich im ebenen Spannungszustand im allgemeinsten Fall zu einer Ellipse.

b) Die Endpunkte der Spannungen für die Schnitte um einen Punkt liegen im ebenen Belastungszustand auf einer Ellipse.

c) Spannungs- und Dehnungs-Ellipse sind nicht kongruent.

d) Spannungs- und Dehnungshauptachsen decken sich.

e) Ganz allgemein bestehen zwischen Dehnungen und Drehungen die gleichen Zusammenhänge, wie zwischen Längs- und Schubspannungen.

Entsprechend diesen angegebenen Sätzen können auch die Spannungs- und Dehnungsregelkörper miteinander in Beziehung gebracht werden. Diese Regelkörper können je nach dem Belastungsfall in einfachere Gebilde übergehen. Durch diese Zusammenhänge ergibt sich die Möglichkeit, aus den gemessenen Dehnungen die Spannungen zu bestimmen.

2. Ermittlung der Dehnungen.

Zur Bestimmung der Dehnungen an den Knotenblechen wurde in deren polierte Oberflächen ein Netz von Linien parallel und senkrecht zur Gurtung eingeritzt, so daß lauter quadratische Elemente von 20 mm Seitenlänge entstanden. Die Netze der beiden Oberflächen eines Knotenbleches decken sich. Die Seitenlänge dieser Quadrate und somit auch der Durchmesser des eingeschriebenen Kreises entspricht der Meßlänge des Dehnungsmessers. Die ermittelten Dehnungen der Durchmesser dieses Kreises werden dem Kreismittelpunkte zugeschrieben. Es muß hierbei bemerkt werden, daß infolge der endlichen Meßlänge diese dem Kreismittelpunkt zugeschriebenen Dehnungen von den wirklichen Werten abweichen. Diese Fehler sind um so größer, je mehr sich die Dehnungen längs der verschiedenen Schnitte durch das Einheitsfeld von 20 mm Seitenlänge ändern. Dies ist besonders nahe an Angriffspunkten von Kräften der Fall, so daß dort nur mit noch kleineren Meßlängen gearbeitet

werden kann, wenn man genaue Werte erhalten will. Da, wo die Dehnungskurven nur geringe Krümmungen aufweisen, genügt die hier angewendete Meßlänge, was an besonderen Proberechnungen gezeigt werden kann. Wie aus den später folgenden Spannungsbildern ersichtlich ist, weisen die Spannungskurven und somit auch die Dehnungskurven innerhalb der Länge von 20 mm geringe Krümmungen auf, so daß sie auf diese Länge als Gerade betrachtet werden können. Durch das Ausgleichen der Messungen um einen Punkt können die erhaltenen Werte noch verbessert werden.

Die quadratischen Elemente wurden so angeordnet und die zugehörigen Messungen so durchgeführt, daß einander entsprechende Teile bei verschiedenen Knotenblechen und Belastungszuständen leicht verglichen werden können. Gemessen wurden gewöhnlich auf beiden Oberflächen die Dehnung der Kreisdurchmesser parallel zu den Quadratseiten und die Deformation von einem oder von beiden Durchmessern in der Diagonalrichtung. Durch diese Messungen ist es möglich, den Dehnungs- und Spannungszustand eines Elementes festzustellen, da durch 3 bekannte Dehnungen in gegebenen Richtungen der Dehnungszustand um einen Punkt bestimmt ist. Wie aus Abb. 8 ersichtlich ist, werden sie nach

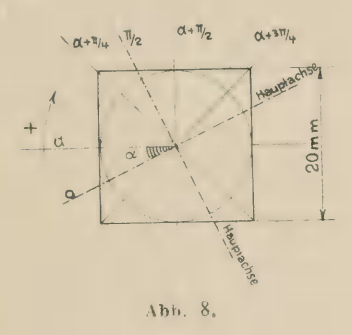


Abb. 8.

der noch unbekannten Hauptspannungsrichtung orientiert, die mit den Rissen parallel der Gurtung den Winkel α einschließt. Wir bezeichnen demnach mit

ε_α, $\varepsilon_{\alpha + \pi/2}$ die Dehnung für die Längeneinheit in der Richtung parallel und senkrecht zur Gurtung,

$\varepsilon_{\alpha + \pi/4}$, $\varepsilon_{\alpha + 3\pi/4}$ die Dehnung für die Längeneinheit in den Diagonalrichtungen,

ε_0, $\varepsilon_{\pi/2}$ die Dehnung für die Längeneinheit in der Richtung der Hauptachsen.

Die entsprechenden Spannungswerte sollen mit

$$\sigma_\alpha,\ \sigma_{\alpha + \pi/2},\ \sigma_{\alpha + \pi/4},\ \sigma_{\alpha + 3\pi/4},\ \sigma_0,\ \sigma_{\pi/2},$$
$$\tau_\alpha,\ \tau_{\alpha + \pi/2},\ \tau_{\alpha + \pi/4},\ \tau_{\alpha + 3\pi/4}$$

bezeichnet werden.

Die Dehnungen wurden so ermittelt, daß von einer Anfangsbelastung aus der Probekörper beziehungsweise Probeträger zweimal voll belastet und dann wieder entlastet wurde, so daß 5 Ablesungen entstanden. Der Mittelwert aus den sich ergebenden 4 Unterschieden wurde als Dehnung der betreffenden Richtung bezeichnet. Als Grenze der Zulässigkeit einer Messung wurde die Abweichung der letzten von der ersten Ablesung mit 3 mm 10^{-4} und später mit 2 mm 10^{-4} festgesetzt. Zwischenbelastungen wurden nicht vorgenommen wegen des sonst schon überreichen Zahlenmaterials Es sollen in Zahlentafel 1 S. 14 einige Beispiele von Dehnungsmessungen angeführt werden.

Zahlentafel 1. Knotenblech 4A. Belastungsfall 1.

Allgemeines				Messungen					Ausmittlung					Dehnung	
	Ort	Apparat No.	Datum	P_0 0 t	P_1 50 t	P_0 0 t	P_1 50 t	P_0 0 t	1	2	3	4	Mittel	μ[1])	mm 10^{-3}
30	α	1	28. IV	19,9	24,5	19,9	24,3	19,8	+ 4,6	+ 4,6	+ 4,4	+ 4,5	+ 4,53	0,935	+ 4,20
	$\alpha + \pi/2$	3	28. IV	29,5	27,8	29,5	27,8	29,5	− 1,7	− 1,7	− 1,7	− 1,7	− 1,70	1,000	− 1,70
	$\alpha + \pi/4$	1	28. IV	26,6	22,2	26,7	22,2	26,7	− 4,4	− 4,5	− 4,5	− 4,5	− 4,48	0,935	− 4,20
	$\alpha + 3\pi/4$	3	28. IV	19,2	26,0	19,2	26,0	19 5	+ 6,8	+ 6,8	+ 6,8	+ 6,5	+ 6,73	1,000	+ 6,73
130	α	2	29. IV	23,5	27,5	23,6	27,5	23,8	+ 4,0	+ 3,9	+ 3,9	+ 3,7	+ 3,88	0,895	+ 3,48
	$\alpha + \pi/2$	4	29. IV	28,3	26,5	28,3	26,5	28,3	− 1,8	− 1,8	− 1,8	− 1,8	− 1,80	0,945	− 1,69
	$\alpha + \pi/4$	3	29. IV	20,5	16,3	20,5	16,4	20,3	− 4,2	− 4,2	− 4,1	− 3,9	− 4,10	1,000	− 4,10
	$\alpha + 3\pi/4$	2	29. IV	32,2	39,0	32,2	39,0	32,2	+ 6,8	+ 6,8	+ 6,8	+ 6,8	+ 6,80	0,895	+ 6,08
62	α	1	28. IV	22,0	26,7	22,0	26,7	22,0	+ 4,7	+ 4,7	+ 4,7	+ 4,7	+ 4,70	0,935	+ 4,40
	$\alpha + \pi/2$	1	28. IV	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,935	0,00
	$\alpha + \pi/4$	3	28. IV	26,9	26,0	27,1	26,1	27,1	− 0,9	− 1,1	− 1,0	− 1,0	− 1,0	1,00	− 1,00
	$\alpha + 3\pi/4$	1	28. IV	23,2	28,5	23,2	28,4	23,1	+ 5,3	+ 5,3	+ 5,2	+ 5,3	+ 5,28	0,935	+ 4,95
162	α	4	5. V	22,1	26,6	22,1	26,6	22,1	+ 4,5	+ 4,5	+ 4,5	+ 4,5	+ 4,50	0,945	+ 4,25
	$\alpha + \pi/2$	4	5. V	24,9	25,0	24,9	25,0	24,9	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,10	0,945	+ 0,09
	$\alpha + \pi/4$	1	6. VI	25,9	24,6	26,0	24,8	26,0	− 1,3	− 1,4	− 1,2	− 1,2	− 1,28	0,940	− 1,20
	$\alpha + 3\pi/4$	2	5. V	28,6	34,8	28 6	34,8	28,6	+ 6,2	+ 6,2	+ 6,2	+ 6,2	+ 6,20	0,895	+ 5,55
63	α	4	28. IV	22,0	26,5	22,0	26,5	22,1	+ 4,5	+ 4,5	+ 4,5	+ 4,4	+ 4,48	0,945	+ 4,24
	$\alpha + \pi/2$	1	28. IV	17,1	16,9	17,1	16,8	17,1	− 0,2	− 0,2	− 0,3	− 0,3	− 0,25	0,935	− 0,24
	$\alpha + \pi/4$	2	28. IV	26,3	26,8	26,3	26,8	26,3	+ 0,5	+ 0,5	+ 0,5	+ 0,5	+ 0,50	0,895	+ 0,45
	$\alpha + 3\pi/4$	1	28. IV	17,9	21,9	17,8	21,9	17,8	+ 4,0	+ 4,1	+ 4,1	+ 4,1	+ 4,08	0,935	+ 3,82
163	α	1	4. VI	27,5	31,8	27,5	31,9	27,5	+ 4,3	+ 4,3	+ 4,4	+ 4,4	+ 4,35	0,945	+ 4,10
	$\alpha + \pi/2$	1	4. VI	25,7	25,5	25,6	25,5	25,4	− 0,2	− 0,1	− 0,1	+ 0,1	− 0,08	0,945	− 0,07
	$\alpha + \pi/4$	3	4. VI	24,2	24,4	24,3	24,4	24,3	+ 0,2	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,13	1,000	+ 0,13
	$\alpha + 3\pi/4$	1	6. VI	24,9	29,0	25,0	29,0	25,0	+ 4,1	+ 4,0	+ 4,0	+ 4,0	+ 4,03	0,945	+ 3,80
64	α	4	28. IV	24,0	28,2	24,0	28,1	24,0	+ 4,2	+ 4,2	+ 4,1	+ 4,1	+ 4,15	0,945	+ 3,93
	$\alpha + \pi/2$	3	28. IV	23,9	23,2	23,9	23,1	23,9	− 0,7	− 0,7	− 0,8	− 0,8	− 0,75	1,000	− 0,75
	$\alpha + \pi/4$														
	$\alpha + 3\pi/4$	1	28. IV	17,0	20,1	17,0	20,1	17,0	+ 3,1	+ 3,1	+ 3,1	+ 3,1	+ 3,10	0,935	+ 2,90
164	α	3	4. V	26,0	29,7	26,0	29,7	26,0	+ 3,7	+ 3,7	+ 3,7	+ 3,7	+ 3,70	1,000	+ 3,70
	$\alpha + \pi/2$	1	4. V	28,0	27,9	27,9	27,9	27,9	− 0,1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,935	0,00
	$\alpha + \pi/4$														
	$\alpha + 3\pi/4$	1	4. V	26,0	29,5	26,1	29,5	26,1	+ 3,5	+ 3,4	+ 3,4	+ 3,4	+ 3,43	0,935	+ 3,21

[1]) μ = mittlerer Dehnungswert für einen Skalenteil.

Die Meßnummern der beiden Seiten eines Elementes sind durch Zahlen gekennzeichnet, die sich um 100 unterscheiden. Es gehören demnach die Messungen Nr. 30 und Nr. 130 dem gleichen Feld an. Der Ort der oben angegebenen Felder ist in der allgemeinen Uebersichtszeichnung von Knotenblech 4 A Tafel 4 Fig. 23 eingezeichnet. Im allgemeinen wurden an jedem Element nur in drei Richtungen Messungen ausgeführt und nur an einzelnen wichtigen Schnittpunkten die Probemessung in der vierten Richtung vorgenommen. Ferner wurde nur jedes zweite Feld bei den Knotenblechen 4 A und 3 A und später, als sich der Verlauf der Spannungslinien für die verschiedenen Schnitte sehr einfach erwies, bei den übrigen Knotenblechen nur jedes fünfte Feld vermessen. Die Felder wurden so angeordnet, daß sie Werte für die festgelegten wagerechten, senkrechten und diagonalen Schnitte durch das Knotenblech lieferten.

Beim Probeträger wurde die Eigenlast und die Belastungsvorrichtung als Anfangsbelastung betrachtet. Damit die Apparate richtig einspielten, wurde erst nach einer erfolgten Belastung und Entlastung die erste Ablesung vorgenommen. Vielfach wurden die gleichen Messungen mit anderen Apparaten wiederholt, um Fehler auszuschalten. Es muß hierbei betont werden, daß sehr oft außerordentliche Schwierigkeiten zum richtigen Befestigen der Meßapparate zu überwinden waren. Es sei z. B. nur auf die Stellen zwischen Diagonale und Pfosten und auf die Winkelränder aufmerksam gemacht. Hier leisteten die verwendeten Elektromagnete große Dienste, wobei besonders der Kragarm es ermöglichte, auch an schwer zugänglichen Orten zuzukommen.

Vielfach sind die sich entsprechenden Dehnungen an beiden Oberflächen etwas verschieden, indem infolge seitlichen Ausweichens der Füllungsglieder Biegungsmomente auftreten. Hiervon soll später die Rede sein.

3) Ableitung der Spannungsformeln aus den Dehnungen.

Nach Abb. 8 gilt bezüglich der Hauptachsen

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_\alpha &= \varepsilon_0 \cos^2\alpha + \varepsilon_{\pi/2}\sin^2\alpha \\ \varepsilon_{\alpha+\pi/2} &= \varepsilon_0 \sin^2\alpha + \varepsilon_{\pi/2}\cos^2\alpha \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \quad (1),$$

$$\varepsilon_\alpha + \varepsilon_{\alpha+\pi/2} = \varepsilon_0 + \varepsilon_{\pi/2} = \varepsilon_{\alpha+\pi/4} + \varepsilon_{\alpha+3\pi/4} = \text{konst.} \quad \ldots \quad (2),$$

$$\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\alpha+\pi/2} = \cos 2\alpha(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\pi/2}) \quad \ldots \ldots \quad (3).$$

Während die Gl. (2) einen Zusammenhang zwischen den vier Dehnungsmessungen ergibt, der zur Prüfung der Meßergebnisse sehr willkommen ist, erlaubt die Gl. (3) die Bestimmung der Spannungshauptachsen. Es ist nach dieser Gleichung

$$\varepsilon_{\alpha+\pi/4} - \varepsilon_{\alpha+3\pi/4} = -\sin 2\alpha\,(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\pi/2})$$

und somit

$$\operatorname{tg} 2\alpha = -\frac{\varepsilon_{\alpha+\pi/4} - \varepsilon_{\alpha+3\pi/4}}{\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\alpha+\pi/2}} \quad \ldots \ldots \quad (4).$$

Wenn allgemein die folgenden Abkürzungen eingeführt werden:

$$\varepsilon_\alpha + \varepsilon_{\alpha+\pi/2} = \Sigma_\alpha$$

$$\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\alpha+\pi/2} = D_\alpha$$

$$\varepsilon_{\alpha+\pi/4} - \varepsilon_{\alpha+3\pi/4} = D_{\alpha+\pi/4}$$

usw.,

so wird

$$\operatorname{tg} 2\alpha = -\frac{D_{\alpha+\pi/4}}{D_\alpha} \quad \ldots \ldots \quad (4a)$$

und

$$\alpha = -\tfrac{1}{2}\operatorname{arc\,tg}\frac{D_{\alpha+\pi/4}}{D_\alpha} \quad \ldots \ldots \quad (4b).$$

Die Hauptdehnungen ergeben sich aus Gl. (2) und (3), die etwas verändert lauten

$$\Sigma\alpha = \varepsilon_0 + \varepsilon_{\pi/2},$$
$$\frac{D\alpha}{\cos 2\alpha} = \varepsilon_0 - \varepsilon_{\pi/2}.$$

Nun ist

$$\frac{1}{\cos 2\alpha} = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 2\alpha} = \frac{1}{D\alpha}\sqrt{D_\alpha{}^2 + D_{\alpha}{}^2{}_{+\pi/4}},$$

somit
$$\sqrt{D_\alpha{}^2 + D_\alpha{}^2{}_{+\pi/4}} = \varepsilon_0 - \varepsilon_{\pi/2} = \text{konst.}$$

Hieraus ergibt sich

$$\varepsilon_0 = {}^1/_2 \left[\Sigma_\alpha + \sqrt{D_\alpha{}^2 + D_\alpha{}^2{}_{+\pi/4}}\right] \quad \ldots\ldots \quad (5),$$
$$\varepsilon_{\pi/2} = {}^1/_2 \left[\Sigma_\alpha - \sqrt{D_\alpha{}^2 + D_\alpha{}^2{}_{+\pi/4}}\right] \quad \ldots\ldots \quad (5\text{a}).$$

Durch diese Angaben ist der Dehnungszustand um einen Punkt bestimmt. Um auf den Spannungszustand übergehen zu können, wird die folgende Beziehung verwendet:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{E}\left[\sigma_0 - \frac{\sigma_{\pi/2}}{m}\right] \quad \ldots\ldots \quad (6),$$
$$\varepsilon_{\pi/2} = \frac{1}{E}\left[\sigma_{\pi/2} - \frac{\sigma_0}{m}\right] \quad \ldots\ldots \quad (6\text{a}).$$

Hierbei ist

$$E = 2150 \text{ t/cm}^2,$$
$$m = 10/3.$$

Werden aus Gl. (5) und (6) die Hauptdehnungen ε_0 und $\varepsilon_{\pi/2}$ ausgesondert, so erhält man die Hauptspannungen

$$\sigma_0 = \frac{mE}{2}\left[\frac{\Sigma\alpha}{m-1} + \frac{\sqrt{D_\alpha{}^2 + D_\alpha{}^2{}_{+\pi/4}}}{m+1}\right] \quad \ldots\ldots \quad (7),$$
$$\sigma_{\pi/2} = \frac{mE}{2}\left[\frac{\Sigma\alpha}{m-1} - \frac{\sqrt{D_\alpha{}^2 + D_\alpha{}^2{}_{+\pi/4}}}{m+1}\right] \quad \ldots\ldots \quad (7\text{a}).$$

Sind die Hauptspannungen bekannt, so lassen sich auch die übrigen Spannungen für Schnitte um den betreffenden Punkt bestimmen.

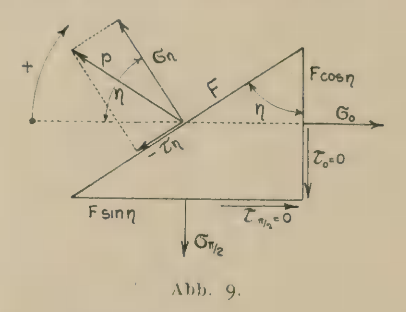


Abb. 9.

Es soll nach Abb. 9 ein allgemeiner Drehwinkel η, der in Uhrzeigerrichtung wächst, eingeführt werden im Gegensatz zum Winkel α, der für eine bestimmte Richtung festgelegt ist. Die Schubspannung soll dann positiv sein, wenn sie den Elementkörper in Uhrzeigerrichtung drehen will. In diesem Fall lauten die allgemeinen Spannungsgleichungen

$$\sigma_\eta = \frac{\sigma_0 + \sigma_{\pi/2}}{2} + \frac{\sigma_0 - \sigma_{\pi/2}}{2}\cos 2\eta \quad \ldots\ldots \quad (8),$$

$$\tau_\eta = \quad - \frac{\sigma_0 - \sigma_{\pi/2}}{2}\sin 2\eta \quad \ldots\ldots \quad (8\text{a}).$$

Werden für die Hauptspannungen die Ausdrücke mit den Dehnungswerten eingesetzt, so folgt

$$\sigma_\eta = \frac{mE}{2}\left[\frac{\Sigma\alpha}{m-1} + \frac{\sqrt{D\alpha^2 + D\alpha^2{}_{+\pi/4}}}{m+1}\cos 2\eta\right] \quad \ldots \ldots \quad (9),$$

$$\tau_\eta = \qquad -\frac{mE}{2}\left[\frac{\sqrt{D\alpha^2 + D\alpha^2{}_{+\pi/4}}}{m+1}\sin 2\eta\right] \quad \ldots \ldots \quad (9a).$$

Gehen wir auf den festgelegten Winkel α ein, so ist dieser nach früherer Berechnung

$$\cos 2\alpha = \frac{D\alpha}{\sqrt{D\alpha^2 + D\alpha^2{}_{+\pi/4}}}$$

und aus Gl. (4a) folgt dann

$$\sin 2\alpha = -\frac{D\alpha_{+\pi/4}}{\sqrt{D\alpha^2 + D\alpha^2{}_{+\pi/4}}}.$$

Werden diese Ausdrücke für $\sin 2\alpha$ und $\cos 2\alpha$ in Gl. (9) eingesetzt, dann ergibt sich

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_\alpha &= \frac{mE}{2}\left[\frac{\Sigma_\alpha}{m-1} + \frac{D\alpha}{m+1}\right] \\
\sigma_{\alpha+\pi/2} &= \frac{mE}{2}\left[\frac{\Sigma\alpha}{m-1} - \frac{D\alpha}{m+1}\right] \\
\tau\alpha &= \frac{mE}{2}\,\frac{D\alpha_{+\pi/4}}{m+1} \\
\tau_{\alpha+\pi/2} &= -\frac{mE}{2}\,\frac{D\alpha_{+\pi/4}}{m+1}
\end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (10).$$

In analoger Weise können die Diagonalspannungen berechnet werden; es ist in den obigen Formeln zu setzen

für $\sigma_{\alpha+\pi/4}$ und $\sigma_{\alpha+3\pi/4}$ der Ausdruck $D_{\alpha+\pi/4}$ statt D_α

» $\tau_{\alpha+\pi/4}$ » $\tau_{\alpha+3\pi/4}$ » » $-D_\alpha$ » $D_{\alpha+\pi/4}$.

Die größte Schubspannung ist bei $\eta = 45^0$

$$\tau_{\max} = \mp\frac{mE}{2}\left[\frac{\sqrt{D\alpha^2 + D\alpha^2{}_{+\pi/4}}}{m+1}\right] \quad \ldots \ldots \ldots \quad (11).$$

Bei der Anwendung der Gleichungen (7) bis (11) zeigt sich, daß die Hauptspannungen in gewissen Fällen dem Vorzeichen nach nicht sofort bestimmt werden können. Dies kommt daher, daß der Ausdruck $\sqrt{D_\alpha^2 + D\alpha^2{}_{+\pi/4}}$ kein bestimmtes Vorzeichen erhält. Die Gl. (4) legt somit nur diejenige Spannungshauptachse fest, die den Winkel $< \pm 45^0$ mit der Ausgangslinie einschließt. Ueber die Vorzeichen der Hauptspannungen gibt sie keinen Aufschluß. Das Vorzeichen des Ausdruckes $\sqrt{D_\alpha^2 + D\alpha^2{}_{+\pi/4}}$ kann mittelbar nach einem früheren Zusammenhang ermittelt werden.

Es ist

$$\frac{D\alpha}{\cos 2\alpha} = \varepsilon_0 - \varepsilon_{\pi/2} \doteq \sqrt{D_\alpha{}^2 + D\alpha^2{}_{+\pi/4}}.$$

Da nun der Winkel α sich nur zwischen $\pm 45^0$ ändert, so ist der Cosinus des Doppelwinkels immer positiv. Das Vorzeichen von $\sqrt{D_\alpha^2 + D_\alpha{}^2{}_{+\pi/4}}$ ist daher gleich dem von D_α.

Sämtliche hier abgeleitete Formeln haben den allgemeinen Spannungsgesetzen zu genügen. Es soll hierbei nur auf die in Gl. (10) abgeleitete Schubspannungsformel aufmerksam gemacht werden.

Diese ist

$$\tau_\alpha = \frac{mE}{2(m+1)} D_{\alpha+\pi/4} = G D_{\alpha+\pi/4} = G\gamma_\alpha,$$

wobei G den Schubmodul und
γ " Schubwinkel

bedeuten.

Wie nun leicht gezeigt werden kann, ist

$$\gamma_\alpha = D_{\alpha+\pi/4} = \varepsilon_{\alpha+\pi/4} - \varepsilon_{\alpha+3\pi/4},$$

d. h. es ergibt sich auf einfache Weise die Möglichkeit, den Winkel, um den sich ein Kreisdurchmesser bei der Deformation dreht, zu bestimmen Dieser Schubwinkel ist gleich dem Unterschied der Dehnungen der unter $\pm 45^0$ zum gedrehten Durchmesser geneigten Längeneinheiten.

Zum rechnerischen Gebrauch lassen sich die abgeleiteten Formeln bedeutend vereinfachen. Wir führen hierzu folgende Abkürzungen ein:

$$\frac{mE}{2}\,\frac{\Sigma_\alpha}{m-1} = A = 153{,}6\,\Sigma_\alpha$$

$$\frac{mE}{2}\,\frac{D_\alpha}{m+1} = B = 83\,D_\alpha$$

$$\frac{mE}{2}\,\frac{D_{\alpha+\pi/4}}{m+1} = B' = 83\,D_{\alpha+\pi/4}$$

$$\frac{mE}{2}\,\frac{\sqrt{D_\alpha^2 + D_{\alpha+\pi/4}^2}}{m+1} = C = 83\sqrt{D_\alpha^2 + D_{\alpha+\pi/4}^2}.$$

Die eingesetzten Zahlenwerte ergeben sich für

$$m = \frac{10}{3}, \quad E = 2150 \text{ t/cm}^2,$$

$$\Sigma_\alpha,\ D_\alpha,\ \sqrt{D_\alpha^2 + D_{\alpha+\pi/4}^2} \text{ in mm } 10^{-3} \text{ ausgedrückt.}$$

Hierbei wird 1 cm Meßlänge vorausgesetzt; in unserem Falle wären demnach die obigen Beiwerte zu halbieren.

Es ergibt sich dann, in kg/cm² ausgedrückt,

$$\left.\begin{array}{l}\sigma_0\\ \sigma_{\pi/2}\end{array}\right\} = A \pm C \qquad \tau_{max} = \mp C$$

$$\left.\begin{array}{l}\sigma_\alpha\\ \sigma_{\alpha+\pi/2}\end{array}\right\} = A \pm B \qquad \left.\begin{array}{l}\tau_\alpha\\ \tau_{\alpha+\pi/2}\end{array}\right\} = \pm B' \quad \ldots\ldots \quad (12).$$

$$\left.\begin{array}{l}\sigma_{\alpha+\pi/4}\\ \sigma_{\alpha+3\pi/4}\end{array}\right\} = A \pm B' \qquad \left.\begin{array}{l}\tau_{\alpha+\pi/4}\\ \tau_{\alpha+3\pi/4}\end{array}\right\} = \mp B$$

Will man die in einem Versuchskörper bei einer Endlast vorkommenden Spannungen bestimmen, wenn von einer Anfangslast ausgegangen wurde, so sind die in Gl. (12) angegebenen Spannungen noch mit einem Faktor

$$\nu = \frac{\text{Endlast}}{\text{Endlast} - \text{Anfangslast}}$$

zu vervielfachen.

Es soll nun auf S. 19 an einigen Beispielen der Gebrauch dieser Formeln gezeigt werden. Hierbei verwenden wir die gleichen Elemente wie für die Dehnungen. S. 14.

Wie aus den auf S. 19 angeführten Beispielen ersichtlich ist, genügen die vier Messungen um den Elementmittelpunkt nicht genau der angeführten Bedingungsgleichung (2), was einerseits auf die Ungenauigkeit der Messungen zurückzuführen ist und anderseits, wie schon bei der Bestimmung der Dehnungen

Zahlentafel 2. Knotenblech 4A. Belastungsfall 1.

Feld		$2\,\varepsilon_\alpha$ / $2\,\varepsilon_{\alpha+\pi/2}$ / $2\,\varepsilon_{\alpha+\pi/4}$ / $2\,\varepsilon_{\alpha+3\pi/4}$	Korrektur	Σ_α	D_α	D_α^2	$\operatorname{tg} 2\alpha = -\frac{D_{\alpha+\pi/4}}{D_\alpha}$	α	A	B	C	$\sigma_0 = A + C$	$\sigma_\alpha = A + B$	$\tau_\alpha = B'$	$\sigma_{\alpha+\pi/4} = A + B'$	$\tau_{\alpha+\pi/4} = -B$	$\tau_{max} = \mp C$
				$\Sigma_{\alpha+\pi/4}$	$D_{\alpha+\pi/4}$	$D_{\alpha+\pi/4}^2$			$76{,}8\,\Sigma_\alpha$	$41{,}5\,D_\alpha$; $B'\ 41{,}5\,D_{\alpha+\pi/4}$	$41{,}5\,\sqrt{}$	$\sigma_{\pi/2} = A - C$	$\sigma_{\alpha+\pi/2} = A - B$	$\tau_{\alpha+\pi/2} = -B'$	$\sigma_{\alpha+3\pi/4} = A - B'$	$\tau_{\alpha+3\pi/4} = +B$	
Nr.	Richtung	mm 10^{-3}		mm 10^{-3}	mm 10^{-3}	mm 10^{-3}			kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²
30	α	+ 4,20	0,00	+ 2,50	+ 5,90	34,9				+ 245		+ **707**	+ 437	− 452	− 260	− 245	
	$\alpha + \pi/2$	− 1,70	0,00				+ 1,85	+ **30° 50′**	+ 192		+ 515						∓ 515
	$\alpha + \pi/4$	− 4,20	0,00	+ 2,50	− 10,90	118,5				− 452		− **323**	− 53	+ 452	+ 644	+ 245	
	$\alpha + 3\pi/4$	+ 6,73	− 0,03														
130	α	+ 3,48	+ 0,05	+ 1,88	+ 5,18	26,8				+ 215		+ **619**	+ 359	− 423	− 279	− 215	
	$\alpha + \pi/2$	− 1,69	+ 0,04				+ 1,965	+ **31° 30′**	+ 144		+ 475						∓ 475
	$\alpha + \pi/4$	− 4,10	− 0,05	+ 1,88	− 10,18	103,5				− 423		− **331**	− 71	+ 423	+ 567	+ 215	
	$\alpha + 3\pi/4$	+ 6,08	− 0,05														
62	α	+ 4,40	− 0,11	+ 4,18	+ 4,40	19,36				+ 183		+ **628**	+ 504	− 247	+ 74	− 183	
	$\alpha + \pi/2$	0,00	− 0,11				+ 1,352	+ **26° 45′**	+ 321		+ 307						∓ 307
	$\alpha + \pi/4$	− 1,00	+ 0,11	+ 4,18	− 5,96	35,4				− 247		+ **14**	+ 138	+ 247	+ 568	+ 183	
	$\alpha + 3\pi/4$	+ 4,95	+ 0,12														
162	α	+ 4,25	0,00	+ 4,35	+ 4,15	17,2				+ 172		+ **663**	+ 506	− 280	+ 54	− 172	
	$\alpha + \pi/2$	+ 0,09	+ 0,01				+ 1,627	+ **29° 12′**	+ 334		+ 329						∓ 329
	$\alpha + \pi/4$	− 1,20	0,00	+ 4,35	− 6,75	45,6				− 280		+ **5**	+ 162	+ 280	+ 614	+ 172	
	$\alpha + 3\pi/4$	+ 5,55	0,00														
63	α	+ 4,24	+ 0,07	+ 4,14	+ 4,48	20,07				+ 186		+ **550**	+ 504	− 140	+ 178	− 186	
	$\alpha + \pi/2$	− 0,24	+ 0,07				+ 0,752	+ **18° 30′**	+ 318		+ 232						∓ 232
	$\alpha + \pi/4$	+ 0,45	− 0,06	+ 4,14	− 3,36	11,35				− 140		+ **86**	+ 132	+ 140	+ 458	+ 186	
	$\alpha + 3\pi/4$	+ 3,82	− 0,07														
163	α	+ 4,10	− 0,02	+ 3,99	+ 4,17	17,4				+ 173		+ **537**	+ 480	− 152	+ 155	− 173	
	$\alpha + \pi/2$	− 0,07	− 0,02				+ 0,880	+ **20° 45′**	+ 307		+ 230						∓ 230
	$\alpha + \pi/4$	+ 0,13	+ 0,03	+ 3,99	− 3,67	13,5				− 152		+ **77**	+ 134	+ 152	+ 459	+ 173	
	$\alpha + 3\pi/4$	+ 3,80	+ 0,03														
64	α	+ 3,93		+ 3,18	+ 4,68	21,9				+ 194		+ **467**	+ 438	− 109	+ 135	− 194	
	$\alpha + \pi/2$	− 0,75					+ 0,560	+ **14° 40′**	+ 244		+ 223						∓ 223
	$\alpha + \pi/4$	+ 0,28 [1]		+ 3,18	− 2,62	6,86				− 109		+ **21**	+ 50	+ 109	+ 353	+ 194	
	$\alpha + 3\pi/4$	+ 2,90															
164	α	+ 3,70		+ 3,70	+ 3,70	13,65				+ 153		+ **475**	+ 437	− 113	+ 171	− 153	
	$\alpha + \pi/2$	0,00					+ 0,735	+ **18° 10′**	+ 284		+ 191						∓ 191
	$\alpha + \pi/4$	+ 0,49 [1]		+ 3,70	− 2,72	7,40				− 113		+ **93**	+ 131	+ 113	+ 397	+ 153	
	$\alpha + 3\pi/4$	+ 3,21															

[1]) Durch Rechnung ermittelt.

bemerkt wurde, in der verwendeten Meßlänge von 20 mm begründet liegt. Die Fehler wurden bei der Ausgleichung gleichmäßig auf die einzelnen Messungen verteilt.

Die erwähnte Probe der ε-Werte ist eine sehr gute Nachprüfung für die Messungen, da hierdurch leicht Meßfehler festgestellt werden können. In den meisten Fällen stimmte sie sehr gut, wenn man bedenkt, daß der mittlere Fehler der einzelnen Messung zu $\pm$ 15 kg/cm^2 $\sim$ 0,15 mm $\cdot$ 10^{-3} angenommen werden muß. Im ungünstigsten Fall müßte dann ohne Rücksicht auf die Fehler infolge der Meßlänge jede Messung eine Korrektur von $\pm$ 0,15 mm $\cdot$ 10^{-3} erfahren. Da sie jedoch fast immer kleiner ist, scheinen sich einzelne Fehler gegenseitig aufzuheben.

Wo die vierte Messung nicht ausgeführt wurde, wie dies z. B. beim Feld 64 der Fall ist, wurde die Dehnung aus den drei anderen berechnet und die Bestimmung der Spannungen in gewöhnlicher Weise durchgeführt. Mathematisch richtiger wäre es, Formeln mit nur drei Dehnungen, durch die ein ebener Spannungszustand bestimmt ist, aufzustellen. Es wurde jedoch in Anbetracht des Ausgleichens der vier Messungen und der Einfachheit, in der sie in der angegebenen Form erscheinen, darauf verzichtet.

Werden die vier gemessenen und ausgeglichenen Dehnungen an den Enden der zugehörigen Radien des Einheitskreises aufgetragen und wird durch weitere berechnete Dehnungen die Deformationsfigur bestimmt, so entsteht keine Ellipse, sondern eine Kurve höherer Ordnung. Dies rührt davon her, weil der Apparat bei jeder Messung eine Drehung entsprechend seiner Lage zur Dehnungshauptachse erfährt, die von der Größenordnung der Dehnungen selbst ist und die beim Aufzeichnen der Deformationsfigur berücksichtigt werden muß. Ist dies der Fall, dann ergibt sich die theoretische Dehnungsellipse. Diese Drehwinkel der Durchmesser, deren Messung bei der Erläuterung der Schubspannungsformel angegeben wurde, stehen in engstem Zusammenhang mit den Schubspannungen. Sie haben ebenfalls den Wert null in den Hauptachsen und den Höchstwert in den Durchmessern der $\pm 45^0$ Richtung.

Die in den Rechnungsbeispielen angeführten Felder 62 bis 64 sind aufeinanderfolgende Felder des Knotenbleches 4 A längs des Gurtwinkelrandes, und es zeigt sich hier sehr schön die Veränderlichkeit des Winkels α von Feld zu Feld und ebenso die Abweichungen der Hauptachsen an den beiden Außenseiten eines Elementes.

Es soll noch kurz auf die Beziehungen der gegenseitigen Lage der Dehnungs- und Spannungsellipsen der beiden Elementseiten eingetreten werden.

a) Beim ebenen Spannungszustand aus Kräften in der Knotenblechmittelebene decken sich die Spannungsellipsen der beiden Außenseiten und ebenso die Dehnungsellipsen. Es entstehen Spannungs- und Dehnungszylinder. Die Trajektorien decken sich.

b) Bei reiner Biegung in mehreren Ebenen, wobei die Momentendrehachse in der Blechoberfläche ist, decken sich die Spannungsellipsen. Die Dehnungsfiguren haben wohl die gleichen Hauptachsen wie die Spannungsfiguren, sie decken sich jedoch nicht. Als Spannungskörper entstehen somit verschränkte elliptische Kegel, als Dehnungskörper Regelfiguren, die in der neutralen Ebene den nicht verformten Grundkreis aufweisen. Je nach der Wirkungsrichtung der Momente nehmen die Hauptachsen eine bestimmte Richtung ein. Die Minimaltrajektorien der einen Seite decken sich mit den Maximaltrajektorien der anderen Seite.

c) Als allgemeiner Fall kann der ebene Spannungszustand aus Kräften in der Knotenblechmittelebene, kombiniert mit demjenigen aus reiner Biegung, deren Achse in der Blechoberfläche liegt, betrachtet werden, weil die Schubspannungen senkrecht zur Oberfläche eine ganz untergeordnete Rolle spielen. Die Biegung erzeugenden Kräfte wirken meist parallel der Knotenblechebene. Hier schließen die sich entsprechenden Spannungs- und Dehnungsfiguren der beiden Außenseiten einen bestimmten Winkel miteinander ein. Dehnungs- und Spannungskörper sind Regelkörper. Die Trajektorien decken sich nicht mehr. Durch die Kenntnis der Spannungsfiguren an beiden Elementseiten und des Winkels, den die Hauptachsen miteinander einschließen, ist es möglich, das einwirkende resultierende Moment und seine Richtung zu bestimmen.

4. Zusammenhang der Kräfte benachbarter Elemente. Trajektorien.

a) Allgemeines.

Die kleinsten Teile eines jeden homogenen, isotropen, elastischen Körpers ordnen sich bei einem festgelegten Belastungszustand zu einem bestimmten elastischen räumlichen Gewebe senkrecht aufeinander stehender Kraftlinien an. Der Verlauf dieser Kraftlinien kann durch die Trajektorien festgestellt werden, mit deren Hilfe der Zusammenhang der Kräfte benachbarter Punkte bestimmbar ist. Dies räumliche Gewebe hat als äußere Begrenzung die Oberfläche des Körpers, auf die ein System von Kraftlinien senkrecht einmündet und null wird, wo keine äußeren Kräfte wirken. Im anderen Falle richten sie sich nach dem Winkel, den die äußeren Kräfte mit der Oberfläche bilden. Sind die Außenflächen eben, wie dies bei den Knotenblechen der Fall ist, so wird das in ihnen befindliche Trajektoriensystem zweidimensional. Werden die senkrecht auf den beiden parallelen Außenflächen stehenden Trajektorien als Gerade angenommen, so werden auch sämtliche Kraftliniensysteme der tiefer liegenden Knotenblechschichten eben. Dies ist nur dann der Fall, wenn keine Schubspannungen senkrecht zu diesen Außenflächen wirken. Wie schon früher gezeigt wurde, können die Projektionen der Trajektoriensysteme der verschiedenen Schichten auf die Oberfläche abweichend verlaufen. Die größte gegenseitige Abweichung weisen die Systeme der Außenseiten auf.

Die Trajektorien können als Hüllkurven betrachtet werden, indem die als Tangenten betrachteten Hauptspannungsachsen einander zugehöriger Punkte diese einhüllen.

Bei den Kraftlinien ist auch die Größe der Hauptspannungen von Wichtigkeit, da sie sich von Punkt zu Punkt ändern können. Diese Veränderung der Hauptspannungen kann durch Auftragen derselben als Ordinaten über den betreffenden Punkten dargestellt werden. Im weiteren sind beim ebenen Trajektoriensystem die Linien der kleinsten und größten Hauptspannung zu unterscheiden, die sich rechtwinklig schneiden. Werden hier bei jeder Kurve die Spannungsordinaten aufgetragen, so entsteht eine Fläche der kleinsten und eine der größten Hauptspannungen.

b) Mathematische Behandlung der ebenen Trajektorien.

Wir betrachten zwei benachbarte Trajektorienpunkte O und P, deren entsprechende Hauptachsen miteinander den Winkel φ einschließen. Die Ursache zur Aenderung der Hauptspannungsrichtungen und der Hauptspannungen selbst rührt von Kräften her, die auf dies ehemals gerade Kraftlinienstück einwirken. Um einen Zusammenhang zu erhalten, betrachten wir vorerst den Spannungszustand im Punkt O und lassen nachträglich eine Spannung σ_b unter einem Winkel γ zur einen Hauptachse gerichtet einwirken, Abb. 10. Dadurch ändern sich die

Hauptspannungen um $\Delta\sigma_0$ und $\Delta\sigma_{\pi/2}$, und die Hauptachse dreht sich um den Winkel φ.

Allgemein ist bei einem ebenen Belastungszustand die Hauptspannungsrichtung festgelegt durch die Gleichung

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}.$$

Wir berechnen nun den Hauptspannungswinkel für den in Abb. 11 gezeichneten Belastungszustand, wo die alten Hauptspannungen σ_0 und $\sigma_{\pi/2}$ und eine unter dem Winkel γ zu σ_0 gerichtete Zusatzspannung auf das Element einwirken

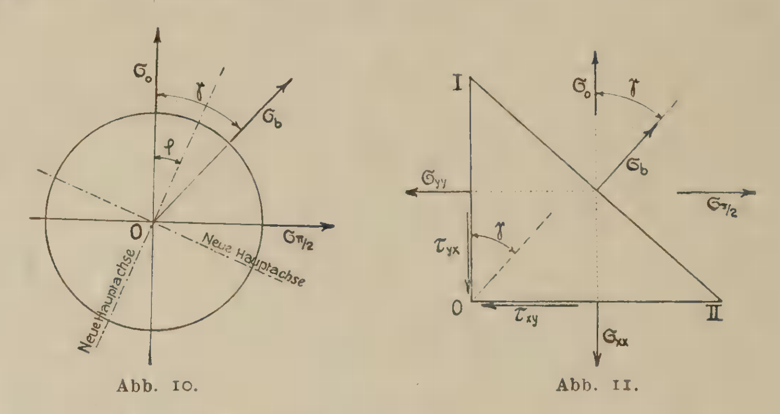


Abb. 10. Abb. 11.

In diesem Fall wird für Schnitt

$$\begin{aligned}
\text{I.}\quad \sigma_{yy} &= \sigma_{\pi/2} + \sigma_b \sin^2\gamma \\
\tau_{xy} &= \qquad\quad \sigma_b \sin\gamma\cos\gamma \\
\text{II.}\quad \sigma_{xx} &= \sigma_0 \quad + \sigma_b \cos^2\gamma.
\end{aligned}$$

Werden diese Werte in die Gleichung für φ eingesetzt, so ergibt sich

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\sigma_b \sin 2\gamma}{\sigma_0 - \sigma_{\pi/2} + \sigma_b \cos 2\gamma} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (13).$$

Diese Gleichung gibt die gesuchte Winkeländerung φ, da sie sich auf das alte Hauptsystem bezieht. Sie ist auch noch gültig, wenn verschiedene σ_b unter verschiedenen Winkeln γ auf das Element einwirken. Man darf daher vor die mit σ_b behafteten Glieder das Summenzeichen setzen.

Die Veränderungen der Hauptspannungen und ihrer Richtungen eines beliebigen Trajektorienelementes können als Folge der Kombination des Spannungszustandes im Ausgangspunkte O mit einem solchen, der durch zwei im betreffenden Elementpunkt als Hauptspannungen senkrecht aufeinander wirkende σ_b dargestellt wird, aufgefaßt werden.

Es ist nun

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2 \operatorname{tg}\varphi}{1 - \operatorname{tg}^2\varphi} = \frac{2y'}{1 - y'^2}$$

$$1 = y'^2 + \frac{2}{\operatorname{tg} 2\varphi}\, y'$$

$$y' = -\frac{1}{\operatorname{tg} 2\varphi} \pm \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\operatorname{tg} 2\varphi}\right)^2}$$

$$y' = -\frac{\sigma_0 - \sigma_{\pi/2} + \Sigma\sigma_b \cos 2\gamma}{\Sigma\sigma_b \sin 2\gamma} \pm \sqrt{1 + \left[\frac{\sigma_0 - \sigma_{\pi/2} + \Sigma\sigma_b \cos 2\gamma}{\Sigma\sigma_b \sin 2\gamma}\right]^2} \quad . \quad (14).$$

Die Gl. (14) ist als Differentialgleichung ebener Trajektorien zu betrachten, die infolge der verschiedenen Vorzeichen des zweiten Gliedes zwei zueinander

senkrechte Kurvenscharen darstellt. Variabel sind darin σ_b und γ, die als Funktion des bestehenden Koordinatensystems auszudrücken sind. σ_0 und $\sigma_{\pi/2}$ sind die Hauptspannungen des Ausgangspunktes, dessen Hauptspannungsrichtungen als Koordinatenachsen dienen können. Da die Trennung der Variablen nicht möglich ist, so ist diese Differentialgleichung nicht lösbar. Es ist dies auch dann nicht der Fall, wenn der Ausgangspunkt ein Nullpunkt ist, wo $\sigma_0 = \sigma_{\pi/2} = 0$ ist.

Es liegt nun der Gedanke nahe, die Kurven der reinen Schubspannungslinien, die beim einfachen Balken als Spezialfall mathematisch gelöst werden können, zu bestimmen. Wenn wir zu diesem Zwecke die Spannungsgleichung

$$\sigma = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\,\alpha + \tau_{xy} \sin 2\,\alpha = 0$$

setzen und das α berechnen, so ergibt sich

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{\tau_{xy}}{\sigma_{yy}} \pm \sqrt{\frac{\tau_{xy}^2 - \sigma_{xx}\,\sigma_{yy}}{\sigma_{yy}^2}}\,.$$

Abgesehen von der Frage reeller oder imaginärer Werte α zeigt sich auch hier die Wurzel und somit auch hier die Untrennbarkeit der Variablen. Die mathemathische Erfassung des Kurvenproblems ist daher auch in dieser Hinsicht nicht möglich, und man muß daher versuchen, aus den Meßergebnissen nähere Eigenschaften der Kurven herauszufinden.

Es soll hierbei besonders auf die in Tafel 1 mit den Buchstaben *N*, *O*, *T*, *R*, *S* bezeichneten Spannungs-Nullpunkte des Kraftfeldes hingewiesen werden, die zugleich auch Dehnungsnullpunkte sind. Die von ihnen ausgehenden Kurven haben asymptotischen Charakter, indem sie bestimmte Kurvensysteme abgrenzen. In diesen Nullpunkten sind die sonst stetigen Grenzkurven unbestimmt, weil ihnen keine bestimmten Hauptachsen zukommen. Mathematisch sind sie als singuläre Punkte zu betrachten. Sämtliche Spannungslinien der durch diese Punkte gehenden Schnitte haben in ihnen ihre Nullpunkte. Bei der Erläuterung der Tafel 1 sollen noch weitere Eigenschaften erwähnt werden.

Die Ermittlung der $\Delta\,\sigma_0$ und $\Delta\,\sigma_{\pi/2}$ kann folgendermaßen stattfinden. Es ist nach der allgemeinen Theorie

$$\sigma_{\substack{\max\\ \min}} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{\max} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}.$$

Werden für die σ_{xx} und σ_{yy} die aus Abb. 11 bestimmten Werte eingesetzt, so erhalten wir als neue Hauptspannungen

$$\left.\begin{matrix}\sigma_0' \\ \sigma_{\pi/2}'\end{matrix}\right\} = \frac{\sigma_0 + \sigma_{\pi/2} + \sigma_b}{2} \pm \sqrt{\left[\frac{\sigma_0 - \sigma_{\pi/2} + \sigma_b \cos 2\gamma}{2}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_b \sin 2\gamma}{2}\right]^2} \quad . \quad . \quad 15).$$

Um Beziehungen über den Hauptspannungszuwachs und σ_b zu erhalten, differenzieren wir die obige Gleichung nach s, indem diese so bezeichneten Bogenlängen als Koordinaten eingeführt werden. In diesem Fall wird, da nur σ_b und γ veränderlich sind,

$$\frac{d\,\sigma_0'}{d\,s} = \frac{1}{2}\,\frac{d\,\sigma_b}{d\,s} + \frac{d\,(F_s)}{d\,s}$$

$$\frac{d\,\sigma_{\pi/2}'}{ds} = \frac{1}{2}\,\frac{d\,\sigma_b}{d\,s} - \frac{d\,(F_s)}{d\,s}$$

$$\frac{d\,\tau_{\max}}{d\,s} = \pm \frac{d\,(F_s)}{d\,s},$$

wobei

$$F_s = \sqrt{\left[\frac{\sigma_0 - \sigma_{\pi/2} + \sigma_b \cos 2\gamma}{2}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_b \sin 2\gamma}{2}\right]^2}$$

bedeutet. Daraus ergibt sich nun

$$\frac{d\,\sigma_0'}{d\,s} + \frac{d\,\sigma_{\pi/2}'}{d\,s} = \frac{d\,\sigma_b}{d\,s} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 16)$$

und

$$\frac{d\,\sigma_0'}{d\,s} - \frac{d\,\sigma_{\pi/2}'}{d\,s} = 2\,\frac{d\,\tau_{\max}}{d\,s} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 17).$$

Aus Gl. (16) geht hervor, daß, wenn die durch Messungen bestimmten Hauptspannungen auf der abgewickelten geraden Trajektorie an den entsprechenden Elementpunkten als Ordinaten aufgetragen werden, in jedem Punkte die Summe der Hauptspannungszunahmen gleich der Zunahme der die Drehung der Hauptachsen erzeugenden Kraftfeldspannungen σ_b ist, gleichviel welche Richtung diese haben.

Aus Gl. (17) ergibt sich, daß der Unterschied der Hauptspannungszunahmen gleich dem doppelten Zuwachs der größten Scherspannung ist. Dieser Satz hat sein Analogon in der Gleichung

$$\frac{\sigma_0 - \sigma_{\pi/2}}{2} = \tau_{\max}.$$

Es ist demnach möglich, wenn für einen Punkt der Trajektorien die σ_b bekannt sind, den weiteren Größenverlauf dieser Spannungen zu verfolgen. Solche Ausgangspunkte sind die Randpunkte.

Allgemein wird es bei Knotenblechen nicht möglich sein, das ganze Trajektoriengebilde mathematisch zu erfassen, weil zu viele Bedingungen auftreten. Man ist daher gezwungen, aus den gemessenen Ergebnissen möglichst allgemeine Schlüsse zu ziehen, um sie da zu verwerten, wo keine Messungen ausgeführt werden können.

c) Ergänzung der gemessenen Trajektorien. Zu Tafel 1 (im Anhang)[1].

Soweit die Dehnungen an der Oberfläche des Knotenbleches gemessen werden können, ist es möglich, die Hauptspannungstrajektorien zu bestimmen und die Kräfte zu ermitteln, die ihnen die Form geben. Leider ist ein großer Teil der Knotenbleche durch Anschlüsse und Laschen verdeckt. Um auch hier einzelne Einblicke über den Trajektorienverlauf zu erhalten, sollen die folgenden orientierenden Angaben gemacht werden, die bei den späteren Versuchen zur Anwendung gelangen. Sie wurden gefolgert aus den Versuchen von Rühl[2]) und den eigenen Versuchen zur Bestimmung der Druckfiguren am Nietloch.

aa) Verlauf der Trajektorien nahe am belasteten Nietloch.

Wird angenommen, daß die Pressungen senkrecht zum Lochrand gerichtet sind, so sind die Minimal- oder Drucktrajektorien die geradlinige Verlängerung der Pressungen. Diese werden somit, soweit der Lochrand gepreßt wird, strahlenförmig vom Lochrand aus verlaufen und werden dann je nach der Umrißlinie des Körpers abgelenkt. Den Radialstrahlen entsprechend, nehmen die Zugtrajektorien die Form konzentrischer Kreisbögen an. Der Verlauf der Trajektorien am ungepreßten Lochrand soll an den Figuren 1 und 3 erläutert werden. Hierbei ist zu unterscheiden bei nachfolgenden belasteten Nietlöchern,

---

[1]) Die Abbildungen der Tafeln (s. den Anhang) sind mit »Fig.«, die im Text mit »Abb.« bezeichnet worden.

[2]) Forschungsheft 221.

ob sie in gleicher oder entgegengesetzter Richtung gepreßt werden und wie groß ihr Abstand ist.

In Fig. 3, Tafel 1 [1]) sind zwei entgegengesetzt gleich belastete Nietlöcher im Abstand d gezeichnet. In diesem Falle wird der Lochrand bei B gedrückt, was erklärt werden kann durch die Rahmenwirkung im Material um das Nietloch herum. Die dem gepreßten Lochrand folgende Zugtrajektorie FAF wird in den zwei Nullpunkten N unstetig und setzt, im rechten Winkel abbiegend, ihren Lauf gegen die Nullpunkte des unteren Nietloches zu fort. Sämtliche Zugtrajektorien außerhalb dieser Grenzkurve nehmen einen stetigen Verlauf um die beiden Löcher an. Diejenigen innerhalb der Grenzlinie münden zwischen den Nullpunkten senkrecht auf den Lochrand ein und haben dort die Hauptspannungswerte null. Die in der Symmetrieachse liegende Kraftlinie wird zur Geraden. Die dem gedrückten Lochrand folgende Drucktrajektorie NBN wird in den Nullpunkten ebenfalls unstetig und biegt dort rechtwinklig ab; die Kurven der äußeren Zugtrajektorienzone rechtwinklig schneidend, setzt sie ihren Lauf fort. Auch diese beschriebene Druckhauptlinie ist eine Grenzkurve. Sie trennt die zwischen den Nietlöchern stetig verlaufenden Minimaltrajektorien von denen, die durch die Löcher unterbrochen werden. Die den Grenzkurven benachbarten stetigen Trajektorien weisen nahe den Nullpunkten scharfe Krümmungen auf, die bei den entfernteren Kurven allmählich flacher werden.

Der Charakter der bereits in der mathematischen Behandlung der Trajektorien erwähnten Nullpunkte wird durch die erfolgten Angaben genügend geklärt sein. Ihre Lage ist abhängig von der Form des genieteten Körpers und vom Nietabstand d.

Fig. 1 weist zwei in gleicher Richtung belastete Nietlöcher auf. Hier können sich am Nietloch I je nach der Größe der Kraft II und deren Abstand d außer den bestehenden Nullpunkten N zwei weitere Nullpunkte N' bilden, die womöglich im Punkt B zusammenfallen, oder es entsteht nur ein Nullpunkt S zwischen den beiden Löchern, Fig. 6. Der Spannungsverlauf am unbelasteten Lochrand I zwischen den Nullpunkten N-N in Fig. 1 ist zu vergleichen mit demjenigen am Rande eines Balkens, der an beiden Enden auf die Länge N-N' elastisch eingespannt ist Auch hier zeigt sich der asymptotische Charakter der durch die Nullpunkte gehenden Kurven. Während bei den Punkten N zwei Grenzlinien sich kreuzen, sind es bei dem Punkte S, Fig 6, deren vier. Es kann so N als einfacher und S als doppelter Nullpunkt bezeichnet werden.

Zu erwähnen ist, daß sämtliche auf den unbelasteten Lochrand senkrecht zulaufenden Kraftlinien dort den Wert null haben. Ferner sind die Schubspannungen für sämtliche Schnitte durch das Lochzentrum in den Randpunkten null, sofern bei Randbelastung diese radial gerichtet ist. Diese Feststellung ist wichtig für Schnitte durch Knotenbleche, bei denen mehrere Löcher in einer Reihe liegen.

In Wirklichkeit sind die Spannungsverhältnisse um ein belastetes Nietloch verwickelter Art, da an den stärkst gepreßten Stellen die Elastizitätsgrenze des Materials überschritten wird und sich eine Ausgleichzone bildet. Ferner ändert sich der Lochleibungsdruck in den verschiedenen Blechtiefen infolge der Deformation des Nietschaftes. Die durch die Nietköpfe ausgeübten Pressungen senkrecht zur Knotenblechoberfläche bewirken, daß auch in dieser Richtung die

---

[1]) Die Abbildungen der Tafeln (s. den Anhang) sind mit »Fig.«, die im Text mit »Abb.« bezeichnet worden.

Kraftlinien endliche Werte annehmen. Deformieren sich die Nietschäfte unsymmetrisch zur Knotenblechmittelebene und treten noch durch die Verschiebungen der Laschen am Knotenblech Reibungskräfte auf, dann wird das ganze elastische Gewebe der Trajektorien einschließlich seiner Umhüllungsflächen dreidimensional.

Wie die Versuche zeigen, tritt eine Häufung von Zugkraftlinien um den belasteten und seitlichen Teil des Nietloches und in den angrenzenden Zonen auf, es kommen demnach dort die größten Zugspannungen vor.

bb) Unbelastetes Nietloch im Trajektorienfeld.

Wie die Fig. 2 zeigt, treten in diesem Falle am Lochrand vier Nullpunkte *N* auf, die bei geradlinig verlaufenden Trajektorien symmetrisch zum Durchmesser parallel dieser Kraftlinien angeordnet sind. Es entstehen dadurch zwei Bündel von Maximal- und Minimalkraftlinien, die radial auf den Lochmittelpunkt zulaufen und am Lochrand den Wert null annehmen. Ein unbelastetes Loch im Kraftfeld ist als Störung anzusehen, indem es einen Teil der dort befindlichen Kraftlinien an sich zieht und die anderen ablenkt.

cc) Weiterer Verlauf der Trajektorien.

Je nach der Form des gespannten Körpers und der Anordnung der darin befindlichen Löcher werden die von den Kraftzentren radial ausgehenden Kraftstrahlen abgelenkt. Dies soll in den Figuren 4 bis 9 dargestellt werden, in denen der Verlauf der Trajektorien in rechteckigen Laschen mit verschiedener Anordnung der Nieten und verschiedener Belastung angegeben ist. Hierbei ist die Kenntnis der Randspannungen von Wichtigkeit, damit man weiß, welche Art von Kraftlinien auf den Rand zuläuft. Entsprechend der Rahmenwirkung im Material um das Nietloch herum treten an der Randlinie *OO*, Fig. 4 und 8, bei gezogener Lasche Zugspannungen, bei gedrückter Lasche Druckspannungen auf. Die Eckpunkte selbst sind Nullpunkte. Je nach den Abmessungen *e*, *f*, *g* kann bei gezogener Lasche und nebeneinander angeordneten Kraftzentren, Fig. 5 und 7, am Rand ein Nullpunkt *T* oder sogar eine Druckzone entstehen. Die Seitenränder weisen bei gezogener Lasche auf der ganzen Länge Zug auf, während bei gedrückter Lasche eine Zugzone *OR* und eine Druckzone *R*—*R'* entsteht. Die Punkte *O* und *R* sind einfache Nullpunkte, während *T* als doppelter Nullpunkt zu bezeichnen ist. Durch sie gehen wieder die bekannten Grenztrajektorien, und sie geben, durch Messungen festgestellt, bereits einen guten Einblick in die Spannungsverhältnisse des Körpers.

Bei Lasten, die an einzelnen Stellen angreifen, wie dies bei Nieten und Bolzen der Fall ist, hat das Material immer das Bestreben, einen Ausgleich zu schaffen, damit es möglichst überall gleichmäßig beansprucht wird. Hierzu ist jedoch immer eine Ausgleichstrecke von bestimmter Länge notwendig. Ist diese erforderliche Länge nicht vorhanden, so tritt dieser Ausgleich nicht vollständig auf. Betrachten wir das Knotenblech in diesem Sinne, so kann es als flacher Körper angesehen werden, an dem in eng begrenztem Raum nach verschiedenen Richtungen in der Blechebene wirkende konzentrierte Kräfte angreifen, die keinen völligen Spannungsausgleich ermöglichen. Die erwähnte Eigenschaft des Materials kommt in dem Trajektorienverlauf sehr schön zur Darstellung, indem sich die Kraftlinien bei parallel laufenden Rändern allmählich zu diesen gleich gerichteten Strängen anordnen. Bei völligem Ausgleich verlaufen die Trajektorien in gleichen Abständen. Laufen die Ränder zusammen oder auseinander, so tun dies die Kraftlinien auch. In den ausgeglichenen Teilen der Zuglasche, Fig. 4,

sind es lauter Zugtrajektorien, die in gleichen Abständen parallel den Längsseiten verlaufen und dann entsprechend den abgelenkten Druckhauptlinien im Laschenkopf das Loch umfassen. Die schon von Schwedler angegebene Seilwirkung zeigt sich somit in ausgeprägtem Maße. Bei der Drucklasche, Fig. 8, sind die Drucktrajektorien parallel den Längsseiten gerichtet, und sie gehen je nach ihrer Lage in stärkeren oder schwächeren Kurven auf das Kraftzentrum zu, ohne in den Laschenkopf zu dringen. Als ihre Grenzlinie ist die Kurve *R' RRR'* bezw. in Fig. 9 *R' RTRR'* zu betrachten. Die senkrecht auf die Ränder der ausgeglichenen Zone zulaufenden Trajektorien sind gerade, und auch sie folgen sich in gleichen Abständen.

Es kann noch von einem inneren Zusammenhang der Kraftlinienstränge gesprochen werden, indem zwei oder mehrere entgegengesetzt belastete Niete unmittelbar für sich geschlossene Kraftfelder erzeugen können, wie dies in Fig. 3 in einfacher Weise dargestellt ist. Bei Knotenblechen mit vielen Kraftangriffspunkten ist es jedoch oft schwierig, diese einander zugehörigen Kraftzentren aufzufinden. Hiervon soll an entsprechender Stelle die Rede sein.

Will man nun den mutmaßlichen Trajektorienverlauf in verdeckten Knotenblechpartien festlegen, so ist in erster Linie notwendig, sich ein Bild zu machen über Größe und Richtung der auftretenden Nietkräfte, wobei auch auf die Einspannungsmomente der angreifenden Stäbe Rücksicht zu nehmen ist. Dadurch ist man bereits in der Lage, nach den in den vorigen Abschnitten gemachten Angaben und den in Tafel 1 gezeichneten Figuren einen allgemeinen Verlauf der Kraftlinien festzulegen. Durch die Verwendung der gemessenen Trajektorien in den unverdeckten Teilen können diese mutmaßlichen Linien noch genauer gezeichnet werden, indem oft aus diesen unmittelbar hervorgeht, zu welcher Nietgruppe sie gehören und auf welches Niet sie zulaufen. Vielfach kann auch durch Rechnung, unterstützt durch Messungen, festgestellt werden, in welchen Schnitten der verdeckten Stellen Druck- oder Zugspannungen auftreten, was wieder zur besseren Ergänzung des Trajektorienbildes beiträgt. Im weiteren soll auf die späteren Anwendungen verwiesen werden.

d) Veränderungen im elastischen Gewebe bei Ueberschreitung der Elastizitätsgrenze.

Bei allen in Spannung versetzten Körpern, seien sie homogen oder unhomogen, treten Kraftfelder auf. Währenddem sich nun diese Kraftfelder bei zunehmender, aber gleichgerichteter Belastung beim homogenen, elastischen, dem Proportionalitätsgesetz folgenden Körper nicht ändern, soweit bei den einzelnen Elementen die Grenzen nicht überschritten werden, sind sie bei den anderen Körpern eine Funktion der Belastungsstärke. Diese Funktion wird dann je nach den Eigenschaften des Materials stetig oder unstetig sein. Bei der Beseitigung des Belastungszustandes verschwindet beim elastischen homogenen Körper das Kraftfeld vollständig, sofern nicht schon vor der Belastung ein Kraftfeld durch die Eigenspannung hervorgerufen wurde. Ein nur teilweise elastischer oder gar unelastischer Körper behält auch bei völliger Entlastung ein Kraftfeld bei. Das gleiche ist der Fall, wenn beim elastischen Körper an einzelnen Elementen die Elastizitätsgrenze überschritten wurde.

Um nun auf die Verhältnisse bei den Knotenblechen einzutreten, ist zu erwähnen, daß es zwei Zonen sind, in denen die Elastizitätsgrenze rasch überschritten werden kann, d. h. die durch den Niet- oder Bolzenschaft gedrückten Teile

vor dem Loch und die unmittelbar folgenden gezogenen Teile seitlich des Loches Am unbelasteten Loch kommen bei vorherrschender Zugbeanspruchung die Stellen in Frage, wo die Häufung der Zugtrajektorien stattfindet. Treten an den erwähnten Orten Ueberschreitungen der Elastizitätsgrenze ein, so verändern gewisse Kraftlinien ihren Lauf. Wie groß die Zonen sind, die im Kraftfeld in Mitleidenschaft gezogen werden, könnte durch Versuche festgestellt werden, indem der Hauptspannungsverlauf vor und nach dem Ueberschreiten der Elastizitätsgrenze in den elastisch gebliebenen Teilen bestimmt wird. Es können jedoch auch durch Schlüsse aus den Dehnungsdiagrammen verschiedene Veränderungen festgestellt werden.

Die Druckzone vor dem Niet, in der die Elastizitätsgrenze überschritten worden ist, wird in einen annähernd plastischen Zustand übergehen, wodurch eine gleichmäßigere Druckübertragung auf das elastisch gebliebene Gewebe stattfindet. Infolge dieses »Ausgleichfutters« wird die Anhäufung der Druckhauptlinien in der Kraftrichtung vermindert, was mit dem Entstehen eines bedeutend größeren Druckbolzens zu vergleichen ist. Dadurch wird aber auch die Anhäufung der Zugkraftlinien vermindert. Diese werden gezwungen, größere Kurven um das Loch zu beschreiben. Es werden demnach überlastete Partien entlastet. Breite und Dicke des Ausgleichfutters wachsen mit zunehmender Belastung. Geht die Belastung auf Null zurück, so bleibt ein Kraftfeld bestehen.

In den Zugzonen seitlich des Nietloches weist die Spannung an der innersten Faser ein gewisses Verhältnis auf zur mittleren Normalspannung des radialen Schnittes senkrecht zur Kraftrichtung. Sobald die Elastizitätsgrenze in den meist beanspruchten Fasern überschritten wird, nimmt dies Verhältnis ab, indem die Spannungszunahme nicht mehr der Dehnungszunahme entspricht. Bei zunehmender Belastung kann beim unbelasteten Nietloch die Abwanderung der Spannungen in weniger beanspruchte Teile so weit gehen, daß bei symmetrischer Materialanordnung zur Kraftrichtung eine gleichmäßige Spannungsverteilung eintritt, siehe Versuch von Föppl in »Drang und Zwang«, Teil I, S. 307. Es müßten daher in diesem Schnitt die Zugkraftlinien gleichmäßig verteilt sein. Bei unsymmetrischer Materialanordnung können allerdings diese erwähnten Reserven nicht in dem Maße zur Geltung kommen. Wie weit der Spannungsausgleich bei belastetem Nietloch stattfindet, ist m. W. noch nicht untersucht worden; auf jeden Fall wird auch hier nach Ueberschreiten der Elastizitätsgrenze eine Verbesserung der Spannungsverhältnisse eintreten.

Hat sich ein Riß gebildet, so häufen sich fast sämtliche Kraftlinien, die vorher durch die gerissene Stelle gingen, am Ende derselben an und befördern so sein weiteres Vordringen. In diesem Falle ändert sich das Kraftfeld unstetig, da sich die Lage der Kraftlinien sprungweise verschiebt.

e) Aenderung des Kraftfeldes bei wechselnder Belastung.

Wechseln die spannungserzeugenden Kräfte ihre Größe und Richtung, so ändert sich das Kraftfeld. Eine innere Verformungsarbeit wird hierbei geleistet, die gleich der Verschiebungsarbeit der sich ändernden Kräfte ist. Bei homogenem Körper geht die Bildung neuer Kraftfelder in einfacherer Weise vor sich als bei unhomogenen, weil sich die neuen Kraftlinien auf dem kürzesten Weg bilden können. Andere Nietkräfte ordnen sich beim Knotenblech zu Gruppen an und erzeugen veränderte lokale Kraftfelder.

Wenn ein Lastenzug über eine Brücke fährt, so wird man sich bei Betrachtung der immer wechselnden Kraftfelder an Knotenblechen und anderen Konstruktionsteilen erst recht klar vom Arbeiten des Materials. Kraftströme von zunehmender und wieder abnehmender Stärke fließen durch die Fachwerkstäbe, zwängen sich durch die Niete hindurch und ergießen sich in die Knotenbleche. Kaum haben sich die Kraftfelder gebildet, so werden sie durch Gegenströme wieder abgebaut und verändert.

f) Zusammenfassung.

Bei jeder Belastung eines Knotenbleches entsteht in ihm ein Kraftfeld. In diesem nehmen einzelne Zugtrajektorien die Form von Seillinien an. Da jedoch die Punkte einer jeden dieser Linien mit solchen benachbarter Seillinien in engem Zusammenhang stehen, so wird dieser das Kraftfeld verkörpernde Begriff zum elastischen Gewebe erweitert. Es kann somit gesagt werden, die Eisenmoleküle ordnen sich für jeden festgelegten Spannungszustand zu einem bestimmten elastischen räumlichen Gewebe senkrecht aufeinander stehender Fäden an. Seine Umrißflächen stimmen mit der Knotenblechoberfläche überein. Bei jedem Wechsel des Belastungszustandes ändert das Gewebe seine innere Struktur. Zu dieser Umänderung wird Zeit und Arbeit benötigt. Im Fließzustande des Materials treten die unter 45^0 zu den erwähnten Hauptspannungslinien gerichteten Schubtrajektorien zu Tage, die nach L. Hartmann (siehe Mohr, Abhandlungen aus der technischen Mechanik, S. 215) bereits vor dem Ueberschreiten der Elastizitätsgrenze nachgewiesen werden können. Es würden sich dadurch die Mittel ergeben, die Hauptspannungskurven auch in den durch Messungen unzugänglichen Knotenblechteilen genauer zu ermitteln.

5. Deformation der Niete.

Verschiedene Merkmale der folgenden Versuche weisen auf eine beträchtliche Deformation der Niete hin. Durch sie wird die Beanspruchung des Knotenbleches auf zwei Arten verändert, wobei nur symmetrisch zur Knotenblechebene beanspruchte Niete in Betracht gezogen werden sollen. Einerseits wird durch die Verbiegung des Bolzens die Lochpressung eine Funktion der Blechtiefe und andererseits ändern sich die Nietkräfte selbst, indem die Einspannmomente der Stäbe und Laschen durch die Nietdeformation beeinflußt werden. Während beim Knotenblech die symmetrische Beanspruchung zu seiner Mittelebene nicht gestört wird, ist dies bei den Anschlußstäben und Laschen der Fall. Bei der Ermittlung der Stabkräfte durch Messungen ist daher darauf Rücksicht zu nehmen, daß die auf den Außenseiten bestimmten Spannungen von Laschen und am Knotenblech befestigten Profilteilen nicht übereinstimmen mit denen an der entsprechenden Stelle der Innenseite. Die auf Kilogramme genaue Spannungsmessung erhöht daher die Genauigkeit nicht.

Bei der mathematischen Behandlung der Nietdeformation sind zwei schwer zu erfassende Umstände in Betracht zu ziehen, die so nur eine allgemeine Klärung zulassen. Es ist dies vor allem die auftretende Reibung zwischen den Berührungsflächen von Knotenblech und den beidseitig angebrachten Anschlußteilen; ferner der unbekannte Zusammenhang zwischen den Einsenkungen des Niet- oder Bolzenschaftes in die Lochwandung und den daraus entstehenden Pressungen bei Ueberschreitung der Elastizitätsgrenze. In der Praxis kommen noch als weitere erschwerende Faktoren in Betracht die vielen Umstände, die beim Bohren der Löcher und Schlagen der Niete entstehen.

Vernachlässigt man die erwähnte Reibung, die bei einer gewissen Belastung[1]) zum Teil überwunden wird, und läßt man das Proportionalitätsgesetz bestehen, so wird sich eine Näherungslösung ergeben, die den Verhältnissen entsprechend noch abzuändern ist.

Die Abb. 12 und 13 stellen den in einer Lasche steckenden Bolzen dar. Wird er als starr betrachtet, dann ist die Einpressung y über die ganze Laschendicke d konstant. Im weiteren bezeichnen wir mit

P die Nietkraft,
p die Nietschaftbelastung für die Längeneinheit,
d_n den Durchmesser des Nietschaftes,
σ_M die Lochpressung in der Kraftachse,
D die Knotenblechdicke.

Nach Schaper, Eiserne Brücken, 4. Aufl. S. 15, ist dann die größte Loch-

$$\sigma_M = K y = 1{,}275 \frac{\frac{P}{2}}{d_n\, d} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18),$$

pressung wo K eine vom Material abhängige Größe ist, die mit derselben Einheit gemessen wird, wie die Elastizitätsziffer E. Bei elastischem Bolzen ist σ_M eine Funktion der Lochtiefe, ebenso die Pressung p des Bolzens. Dann ist

$$\int_0^d p\, dx = \frac{P}{2}$$

$$\sigma_M = 1{,}275 \frac{p}{d_n}.$$

Bei Einsetzung der Senkung in σ_M ergibt sich die Gleichung

$$K y = 1{,}275 \frac{p}{d_n} = \nu\, p \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19),$$

die einen Zusammenhang zwischen Bolzenbelastung und Einpressung liefert.

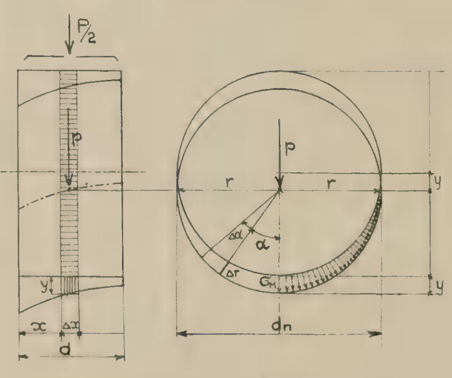


Abb. 12 und 13.

Will man die Biegungslinie des Niet- oder Bolzenschaftes unter Berücksichtigung der Verformung durch die Scherkräfte, die hier die Hauptrolle

[1]) Durch Versuche des Vereins deutscher Brücken- und Eisenbaufabriken ist festgestellt worden, daß ein Gleiten der verbundenen Teile in den Nietverbindungen schon bei verhältnismäßig geringen Beanspruchungen der Verbindungen eintritt. (Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes 1911, Beiheft.) (Dr.-Ing. M. Rudeloff. Versuche im Eisenbau, Heft 3 Ausgabe A. 1921.)

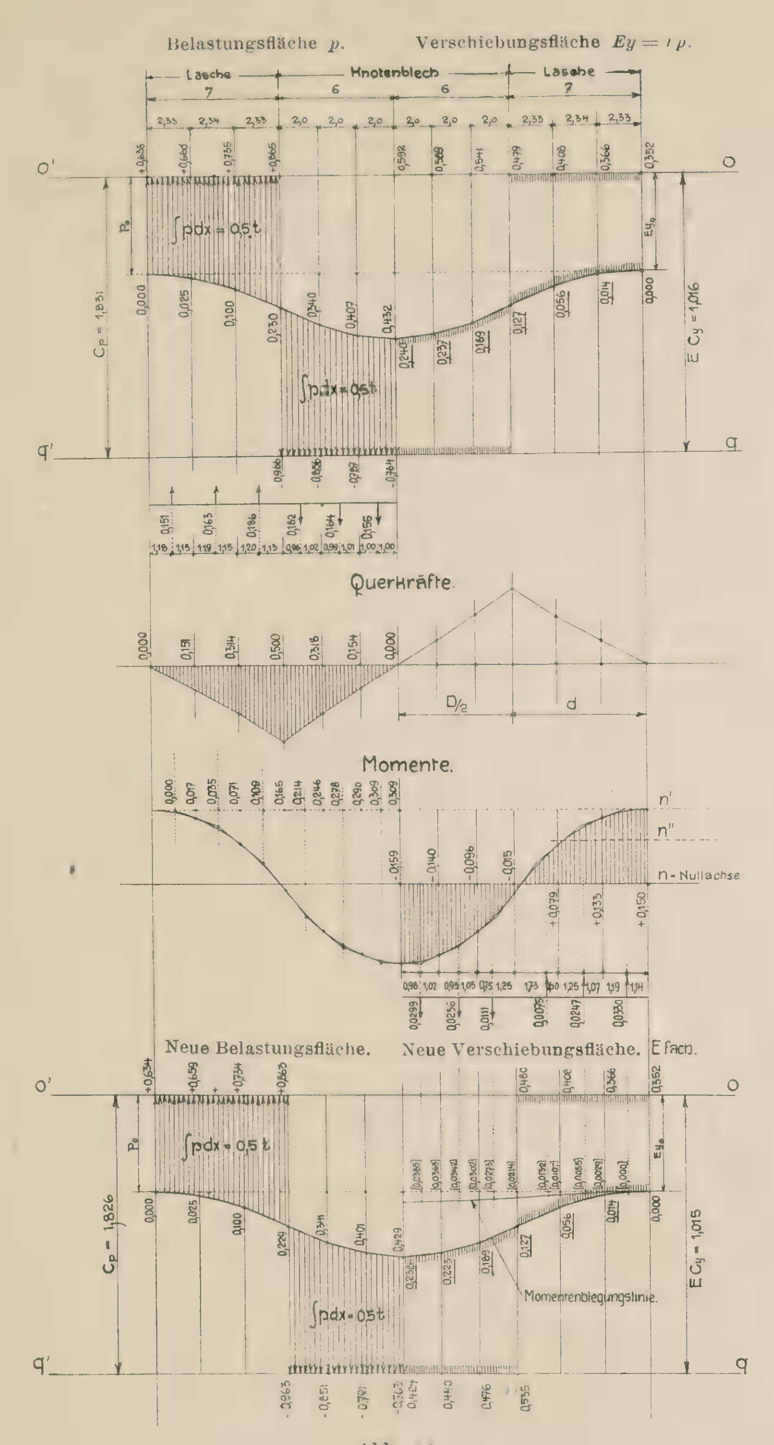


Abb. 14.

Verformung des Nietschaftes für $P = 1$ t.

spielen, ermitteln, so führt das zeichnerische Annäherungsverfahren am schnellsten zum Ziel. Die mathematische Berechnung ist umständlich und für die Praxis ungeeignet.

In Abb. 14 wurden die Lochpressungen bei einem Anschlußniet der [-Eisen am Knotenblech des Probekörpers für die Vorproben Tafel 2 bestimmt. Der Nietschaft wird infolge der Wirkung der Nietköpfe als vollständig eingespannt betrachtet.

Es ist: Nietdurchmesser $d_n = 2{,}3$ cm, $F = 4{,}15$ cm^2 und $J = 1{,}375$ cm^4, Stegdicke der [-Eisen $d = 0{,}70$ cm, Knotenblechdicke $D = 1{,}20$ cm. Zur Vereinfachung wird $K = E$ gesetzt.

Maßgebend für die Bolzenbelastung p sind die in den beiden Laschen und im Knotenblech erzeugten Einpreßstrecken. In der Abb. 14 ist die Achse $o\,o'$ als allgemeine Nullachse zu betrachten. Die Laschen sollen fest bleiben. Nun senkt sich der Bolzen um die Einpressungen in den Laschen und nimmt die Biegungslinie an. Hernach verschiebt sich das Knotenblech weiter um die Einpressungen in der Lochwandung. Die Achse $q\,q'$ stellt demnach die alte, nicht verformte, um die Strecke c_y verschobene Lochwandung des Knotenbleches dar. Wenn die Einpressungen in der Laschenstrecke d mit y bezeichnet werden und in der Knotenblechstrecke D mit $(y - c_y)$, dann betragen die entsprechenden Drücke $p = \frac{1}{\nu} E y$ bezw. $p = \frac{1}{\nu} E (y - c_y)$.

Im weiteren muß die Bedingung erfüllt werden

$$\int_0^d p\,dx = + \frac{P}{2}$$

$$\int_0^{\frac{D}{2}} p\,dx = - \frac{P}{2}$$

Zur Bestimmung der genauen Bolzenlasten p wird eine $\frac{E}{\nu}$ fache Biegelinie für den Bolzen angenommen unter Berücksichtigung der eingespannten Enden. An dieser werden die p so aufgetragen, daß diejenigen für die Laschen oben durch die Nullachse oo', und die für das Knotenblech unten durch die Achse qq', begrenzt werden. Ferner müssen die Integralbedingungen erfüllt sein. Durch die Festlegung der Geraden oo' und qq' erhält man ihren Abstand c_p, der im angeführten Beispiel 1,831 t/cm beträgt und als Pressung zu betrachten ist. Die E fachen Einpressungen ergeben sich durch Vervielfachen der p mit dem Faktor ν. Es ist in diesem Falle

$$E y = \frac{1{,}275}{2{,}30} p = 0{,}555\, p$$

$$E c_y = 0{,}555\, c_p$$

Mit der so erhaltenen Bolzenbelastung p wird die Querkrafts- und Momentenkurve gezeichnet und die Nullachse n in der Momentenkurve so festgelegt, daß die Summe der negativen und positiven Momentenflächen null wird. Beim Bolzen ohne Einspannung ist n' die Nullachse. Bei verschiedenen Einspannungsgeraden kann die Nullachse n'' zwischen die beiden Grenzlagen gelegt werden. Aus diesen so erhaltenen Momentenflächen und Momenten kann die Biegungslinie des Nietschaftes für Momente und Querkräfte bestimmt werden. Es ergeben sich die Ordinaten $E y_m$ für die Momentenbiegungslinie und

$$E y_q = \frac{M E}{G F} = \frac{8}{3} \frac{M}{F}$$

für die Deformationslinie aus den Schubkräften.

Die Einpreßordinaten in die Laschen würden sein

$$y = y_0 + y_m + y_q$$

und in das Knotenblech

$$y - c_y = y_0 + y_m + y_q - c_y,$$

wobei y_0 und c_y unbekannt sind. Zu ihrer Bestimmung werden die Nietpressungen p verwendet. Man bestimmt zu diesem Zweck die $\frac{E}{\nu}$ fache Biegungslinie, indem die erhaltenen Ordinaten $E\,(y_m + y_q)$ mit $\frac{1}{\nu}$ vervielfacht werden.

Hernach werden wieder wie am Anfang die p von dieser Linie aus so aufgetragen, daß

$$\int_0^d p\,dx = +\frac{P}{2}$$

$$\int_0^{\frac{D}{2}} p\,dx = -\frac{P}{2} \text{ wird.}$$

Als äußere Begrenzungen dienen die neuen Linien $o - o'$ und $q - q'$.

Je nach der Annahme, von der ausgegangen wird, werden die neuen p von den früheren abweichen, ebenso das c_p. Eine weitere Wiederholung des Vorganges würde bereits ziemlich genaue Werte liefern.

Das $E y_0$ und $E c_y$ für die Bestimmung der E fachen Einpressungen ergibt sich durch Vervielfachen der Werte p_0 und c_p mit ν.

Die Verformungsarbeit, bestehend aus derjenigen des Bolzens und aus der Einpressungsarbeit an Laschen und Knotenblech, ist

$$A = \frac{1}{2} P c_y.$$

Würde man statt des angenommenen Elastizitätsmoduls E den Beiwert K beibehalten, so ist c_y als Funktion von K zu betrachten.

Diese Verformungsarbeit ist einzuführen bei der Berechnung der Nietkräfte in statisch unbestimmten Nietverbindungen.

Von Wichtigkeit ist nun das Verhältnis der Nietpressungen p und der aus diesen sich ergebenden σ_M am äußeren und inneren Lochrand der Laschen und an den Lochrändern und in der Mitte des Knotenbleches. Hierbei ergibt sich nach unserem Beispiel

$$\frac{D}{d} = \frac{1{,}2}{0{,}7} = 1{,}72$$

und

$$d_n = 2{,}3 \text{ cm}$$

für die Lasche:

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{0{,}863}{0{,}634} = \mathbf{1{,}36}, \quad \frac{\text{Pressung am inneren Rand}}{\text{Pressung am äußeren Rand}}$$

das Knotenblech:

$$\frac{p_1'}{p_0} = \frac{0{,}963}{0{,}763} = \mathbf{1{,}26}. \quad \frac{\text{Pressung am Rand}}{\text{Pressung in Mitte Knotenblech}}$$

Ein weiteres Beispiel hat die Verhältnisse

$$\frac{D}{d} = \frac{1,2}{1,5} = 0,8$$

und

$$d_n = 2,1 \text{ cm}.$$

Hier ist für die Lasche:

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{0,779}{0,074} = \mathbf{10,5},$$

für das Knotenblech:

$$\frac{p_1'}{p_0} = \frac{1,009}{0,735} = \mathbf{1,37}.$$

Diese Ausführungen sollen genügen, um zu zeigen, wie wichtig es ist, die Niet- und Bolzendurchmesser den vorkommenden Profilstärken anzupassen, damit eine gleichmäßigere Spannungsverteilung eintritt.

Die wirklichen Verhältnisse werden je nach Umständen günstiger oder weniger günstig sein. Günstiger werden wirken die zwischen den Berührungsflächen auftretenden Reibungskräfte und die sich bildenden Ausgleichsfutter vor den Löchern bei Ueberschreitung der Elastizitätsgrenze. Ungünstiger werden die Spannungsverteilungen bei geringerem Einspannungsgrad der Enden. Es würden so gut sitzende Niete bedeutend besser sein, als Schraubenbolzen. Das Lockern der Niete kann als allmähliches Nachlassen der Einspannung der Schaftenden betrachtet werden.

Das angegebene Verfahren zur Bestimmung der Lochpressungen erlaubt auch eine Berücksichtigung der Reibungskräfte zwischen den Berührungsflächen und ebenso die Einführung eines mit der Pressung veränderlichen E bei Ueberschreitung der Proportionalitätsgrenze.

Infolge der Verformung des Schaftes oder Bolzens wird auch eine Verformung der Laschen oder angeschlossenen Profilteile entstehen. Die erwähnten Reibungskräfte verteilen sich daher nicht gleichmäßig um das Loch herum, sondern erreichen ihre Höchstwerte entsprechend den größten Nietkopfpressungen an den durch das Nietkopf-Einspannmoment angepreßten Zonen und ihre Kleinstwerte auf der entgegengesetzten Seite. Bezogen auf das Knotenblech sind die größten Reibungskräfte auf der Seite des gepreßten Lochrandes.

Die Gleitbewegung, die nach Ueberwindung der Reibungskräfte eintritt, zerfällt in eine elastische Bewegung, die auf dem elastischen Verhalten des Nietschaftes und der Lochwandung beruht und in eine bleibende Bewegung, verursacht durch die bleibende Einpressung in die Lochwandung, die bleibende Verformung des Nietschaftes und das Auftreten der Reibungskräfte infolge Nietkopfpressung, die das elastische Zurückgehen des Nietschaftes zu verhindern suchen.

IV. Vorversuche. (Hierzu Tafel 2.)

Sie wurden ausgeführt in der eidgenössischen Materialprüfungsanstalt Zürich. Die Meßgeräte mit Bedienung stellte die Generaldirektion der schweizerischen Bundesbahn in freundlicher Weise zur Verfügung.

1. Der Probekörper. Fig. 10.

Der hierzu verwendete Probekörper stellt zwei verschieden breite, 12 mm starke, zur Kraftrichtung symmetrische Knotenbleche dar. Ihre Verbindung wird dadurch bewerkstelligt, daß je zwei Paar [-Eisen Nr. 14, zwischen denen die Knotenbleche A und B befestigt sind, durch zwei Flacheisen 170,10 an den

Enden verbunden werden. Das große Knotenblech A ist durch 6 Niete von 23 mm Dmr., das kleine durch 4 Niete von 23 mm Dmr. an den erwähnten [-Eisen zweischnittig angeschlossen. Die durch je 4 Niete 21 mm Dmr. an die Knotenbleche genieteten Anschlußlaschen dienen zur Einspannung in die Zugmaschine. Die ganze Form des Probeträgers wurde wesentlich durch den Bau dieser Zugmaschine der Materialprüfungsanstalt beeinflußt, da ihre Bauverhältnisse berücksichtigt werden mußten. Ins Praktische übertragen, soll der Versuchskörper einen auf Zug beanspruchten durch ein Knotenblech an biegungsfestem Gurt befestigten Pfosten darstellen.

Durch diese Vorproben wurde versucht, folgende Fragen zu lösen:

a) Wie sind die Spannungsverteilungen in den Knotenblechen und welchen Einfluß übt die Knotenblechform dabei aus?
b) Wie gestaltet sich der Kraftabbau von den Laschen ins Knotenblech?
c) Welchen Einfluß üben die sich durchbiegenden Gurtungen auf das Knotenblech aus?

Die Abmessungen wurden für eine Zugkraft von 20 t gewählt, so daß sich nach gewöhnlicher Berechnung in den Anschlußlaschen eine höchste Spannung von 1360 kg/cm^2 und bei den Knotenblechen eine solche von 1185 kg/cm^2 ergab. Um die Verformung bestimmter Stellen messen zu können, wurden in die polierten Blech- und Laschenoberflächen quadratische Felder von 20 mm Seitenlänge eingeritzt. Für sämtliche Teile wurde Flußeisen gewöhnlicher Handelsqualität vorgesehen.

Die Anschlußniete der Knotenbleche an die [-Eisen wurden von Hand geschlagen, alle übrigen sind Revolverniete.

2. Durchführung der Messungen.

Der Probekörper mußte wagerecht in die Zugmaschine eingespannt werden. Um Durchbiegungen und hieraus entstehende sekundäre Spannungen zu vermeiden, wurde der Mittelteil auf Rollen gelagert. Leider wurde die bleibende Deformation bei den ersten Zugversuchen nicht bestimmt. Die Erweiterung der Trennungsfuge in der Kraftachse wurde

bei den Kräften 0—10—20—10—0 t ermittelt mit
0—0,45—0,97—0,52—0 mm.

Es zeigt sich hieraus ganz deutlich die hemmende Wirkung der Reibungskräfte zwischen den Knotenblechen und den Gurteisen. Als Anfangslast für die Bestimmung der Dehnungen wurde 2,0 t, als Endlast 20,0 t aufgebracht. Bei Zwischenlasten wurden keine Ablesungen gemacht. Wie schon eingangs bei der Ermittlung der Dehnungen angegeben wurde, fand zweimalige Belastung und Entlastung statt. Die Ermittlung der Dehnungen, Hauptspannungen und Spannungen für die verschiedenen Schnitte wurde nach dem bereits erwähnten Verfahren ausgeführt. An den Laschen wurde die Querkontraktion nicht bestimmt. Es wurden dort nur die Dehnungen in den Längsrichtungen der Schnitte I bis VIII gemessen und die Spannungen aus dem einachsigen Spannungszustand berechnet.

An der Unterseite der Knotenbleche und Laschen konnten keine Messungen vorgenommen werden.

3. Gemessene Spannungen am Knotenblech B und an dessen Anschlußlasche.

Da bei beiden Knotenblechen und Anschlußlaschen die Spannungsverteilungen ähnlich sind, so seien der Kürze halber nur die Ergebnisse von B angegeben.

Sie sind in den Figuren 14 und 15 durch die voll schraffierten Streifen und die zugehörigen Zahlen in kg/cm^2 dargestellt.

a) Das Knotenblech. Fig. 14.

Fast allgemein kann gesagt werden, daß sich in den Schnitten senkrecht zur Kraftrichtung, soweit sie nicht durch die Lasche verdeckt sind, die Spannungen gleichmäßig verteilen. Sie sind auf der rechten Seite des Knotenbleches etwas größer, was sich deutlich in den Randspannungen zeigt Dies rührt wahrscheinlich von einem Montagefehler her. Die Messungen ergaben im Schnitt X eine Kraft von 19,215 t statt 20,00 t. Die Randspannungen nehmen mit zunehmender Breite des Knotenbleches bis zu einem Höchstwert auf der Höhe des dritten Nietes zu, fallen dann und steigen später wieder an. Diese Wellenlinie macht sich an beiden Rändern gleichartig geltend und weist darauf hin, daß das dritte Niet bedeutend arbeitet. Beim Knotenblech *A* sind die Randspannungen fast auf der ganzen Länge die gleichen.

Im Schnitt X scheint sich im mittleren Teile eine Senkung zu bilden, die von den seitwärts angebrachten Anschlußnieten herrührt.

Die Schnitte 1 bis 10 parallel der Kraftachse weisen geringe Zugspannungen auf, die sich wenig ändern.

b) Anschlußlasche. Fig. 15

Die an der Außenfläche und an beiden Seiten gemessenen Spannungen nehmen entsprechend dem Abgang der Kräfte ab. Sie sind durch die voll schraffierten Flächen dargestellt. Die im Schnitt I gemessene Kraft beträgt, wenn man die Spannungen gleichmäßig über die Laschendicke verteilt annimmt, 18,0 t statt 20,0 t. Die leichte Einsenkung der Spannungskurve in der Mittelzone rührt vom vorgehenden versenkten Niet her. Diese gleiche Tendenz weisen alle Spannungskurven der Schnitte zwischen den Nieten auf

Werden die gemessenen Spannungen im Schnitt II über die ganze Laschendicke von 30 mm als gleichmäßig verteilt angenommen und die durch den Nietkopf verdeckten Teile ergänzt, so erhält man statt der 20,0 t nur 12,0 t. Es ist wohl kaum denkbar, daß die Reibungskraft zwischen Ende Knotenblech und Schnitt II die fehlenden 8,0 t aufnimmt. Vielmehr wird dieser Unterschied durch die Verformung des dortigen Nietes unter Mitwirkung einer Reibungskraft erzeugt. Daß eine Nietverformung stattfindet, beweist der Spannungsverlauf im Schnitt VIII, wo durch diese sogar Druckspannungen an der Oberfläche erzeugt werden. Als weiterer Beweis dient die im Schnitt III in der Mittelpartie auftretende Zugspannung von 481 kg/cm^2, die bei gleichmäßig über die ganze Laschendicke pressendem Bolzen wohl bedeutend kleiner sein müßte. Nach dem im Abschnitt über Nietverformung angeführten Beispiel müßte die Lochpressung auf der Innenseite etwa zehnmal größer sein, als die der Außenseite. Wenn nun auch dieses Verhältnis infolge der Reibungskräfte kleiner sein wird, so beweist es immerhin, daß infolge der größeren Lochpressungen an der Innenseite dort auch größere Zugspannungen auftreten müssen. Es werden daher die Zug- und Drucktrajektorien nach den innersten Schichten der Lasche zu sich anhäufen. Ihre Ansammlung macht sich bereits im Schnitt I geltend, wodurch der dortige Fehler von 2,0 t erklärt werden kann.

Währenddem sämtliche Schnitte II, IV, VI, VIII durch die Nietachsen sehr stark veränderliche Spannungen aufweisen, zeigt sich in den Schnitten zwischen den Nieten ein gewisser Ausgleich, der aber infolge der kurzen Nietabstände nicht völlig sein kann.

Es soll noch erwähnt werden, daß analog dem stärker gezogenen rechten Knotenblechrand auch der rechte Laschenrand größere Spannungen aufweist.

Die Lasche am Knotenblech *A* weist ganz ähnliche Verhältnisse auf, was als Bestätigung der Messungen dienen soll.

4. Bestimmung des Spannungsverlaufs im Knotenblech *B* unter der Lasche.

Da aus den Messungen an den unverdeckten Stellen des Knotenbleches keine Schlüsse gezogen werden können auf die Spannungsverteilung in den verdeckten Schnitten senkrecht zur Kraftrichtung, so wurde versucht, diese auf mittelbarem Wege zu bestimmen. Der Vorgang ist in den Fig. 11, 12 und 13 dargestellt. Die Lasche des Knotenbleches wurde durch Ausbohren des Setzkopfes der Niete entfernt und ersetzt durch den in Fig. 11 gezeichneten Rahmen. Durch einen Spielraum zwischen den zwei [-Profilen NP 8 kann das Knotenblech gesteckt und daran mit Hilfe eines Bolzens befestigt werden. Die Stellung *I* des Bolzens erlaubt, nahe vor dem belasteten Nietloch messen zu können, die Stellung *II* läßt einen großen Teil hinter demselben offen.

Infolge eines einzelnen Bolzens mußte die Belastung vermindert werden. Ausgangslast war 1,0 t, Endlast 8,0 t. Die Spannungen wurden auf diese 8,0 t bezogen. Der Bolzen wurde in Loch 1, 2 und 3 gesteckt und für jeden dieser Belastungsfälle die Spannungsverteilung in verschiedenen Schnitten bestimmt.

Bei Bolzen in Loch 1 war es infolge der Meßlänge von 20 mm nicht möglich, den vorderen Knotenblechteil so zu vermessen, daß sich ein einwandfreier Zusammenhang ergab. Vom rückwärtsliegenden Teil wurden die zwischen den Löchern 2 und 3 liegenden Felder vermessen, wobei ein ganz ähnlicher Spannungsverlauf ermittelt wurde, wie dies in Fig. 13 der Fall ist. Es wurde daher dieser Belastungszustand zeichnerisch nicht dargestellt. Zu erwähnen ist, daß auch die Spannungszustände der Schnitte durch die Lochmittelpunkte bestimmt wurden, um die Steigerung gegen den Lochrand feststellen zu können. Es ergab sich hierbei für den Schnitt durch Loch 4 das in Fig. 13 eingezeichnete Bild. Näher als 3 mm mit der Schneidenmitte des Meßgerätes an den Lochrand heranzukommen, war nicht möglich. Die ermittelte Zugkraft in diesem Schnitt ergibt unter Ergänzung der innersten Spannungsflächen statt 8,0 t den Wert 8,38 t. Bei einem mittleren σ von 478 kg/cm² ergab sich ein gemessener Höchstwert von 668 kg/cm², das ist eine Steigerung um das 1,4fache. Für den Lochrand selbst wird also die Steigerung noch etwas größer sein.

Bei Bolzen in Loch 2 und 3 weisen die Schnitte senkrecht zur Kraftrichtung im vorderen Knotenblechteil Zug- und Druckspannungen auf. Die Summe der Spannungsflächen muß infolge der Gleichgewichtsbedingungen für jeden der gezeichneten Schnitte gleich null sein. Werden die sich ergebenden Nullpunkte miteinander verbunden, so umgrenzt die daraus entstehende Kurve eine Druckfigur, die je nach den Abmessungen des vorderen Knotenblechteiles geformt ist. Wie aus den Fig. 12 und 13 ersichtlich ist, reicht sie über das darunter befindliche Nietloch hinaus. Die seilförmig geformten Zugtrajektorien infolge Belastung durch einen einzelnen Bolzen reichen bis zum Ende dieser Druckzone. Dort wird die in der Kraftachse liegende gerade Druckhauptlinie null. Es sind für einige Felder die Hauptspannungen und ihre Richtungen bestimmt worden, woraus der vom Bolzen ausgehende strahlenförmige Verlauf der Drucktrajektorien und die seilförmige Umfassung der Zugtrajektorien sehr gut ersichtlich ist. Die Länge der Druckzone wird zum Teil bestimmend sein

für die Spannungsverteilung in den Schnitten durch Loch 2 und 3, d. h. das Verhältnis zwischen der Lochrandspannung und dem Spannungsmittelwert ist auch abhängig von den Abmessungen des dem Druckbolzen vorgelagerten Materials. In welchem Maße dieses Verhältnis durch das Herausschieben der seilförmigen Zughauptlinie verändert wird, konnte nicht ermittelt werden.

Die Spannungsverteilungen in den Schnitten VII, VIII usw. in Fig. 13 erklären sofort, warum beim Knotenblech die in den unverdeckten Teilen gemessenen Spannungen keine großen Variationen zeigen. Charakteristisch ist für den Schnitt VII zwischen den zwei Löchern die in der Mittelpartie auftretende Verminderung der Spannung. Seine Spannungsfläche ergibt statt der 8,0 t eine Kraft von 8,14 t.

Es können nun die für diese verschiedenen Bolzenbelastungen ermittelten Spannungsverläufe der Schnitte III, V, VII unter Wahl bestimmter Bolzenkräfte so übereinander gelagert werden, daß sie angenähert mit denen in den unverdeckten Knotenblechpartien bei vernieteter Anschlußlasche übereinstimmen. Dadurch erhält man neben den gesuchten Spannungslinien unter den Laschen auch die angenäherten Nietkräfte. Ihre Werte sind in die betreffenden Nietlöcher eingetragen worden. Daß das Niet 4 so viel aufnimmt, scheint mit der Form des Knotenbleches im Zusammenhang zu stehen, indem mit zunehmender Breite die Dehnungen abnehmen und so der letzte Nietbolzen am meisten Widerstand findet. Um den Unterschied zwischen den durch lose Bolzen ermittelten Nietkräften und denen der Wirklichkeit zu beheben, wurden die Bolzendrücke um gewisse eingeführte Reibungskräfte vermindert, was für die Anschlußlaschen bei der Ergänzung der Spannungslinien von Bedeutung ist.

5. Rechnerische Ergänzung der Spannungslinien an den Innenseiten der Anschlußlaschen und in den verdeckten Teilen des Knotenbleches.

Sind die Niet- und Reibungskräfte festgelegt, so können die rechnerischen Ergänzungen der Spannungslinien vorgenommen werden. Bei der Annahme, daß die Reibungskräfte auf der Seite des gepreßten Lochrandes des Knotenbleches auftreten, kommen bei diesem für die Schnitte II, IV, VI, VIII die abgebauten Niet- und Reibungskräfte, d. h. die Bolzendrücke voll zur Geltung. Für die entsprechenden Laschenschnitte fallen die Reibungskräfte weg. Die Spannungverhältnisse der Lasche sollen durch die folgende Zahlentafel 3 erläutert werden.

Die gemessene Kraft ist gleich der gemessenen Spannungsfläche, vervielfacht mit dem Laschenquerschnitt. Beachtenswert ist, daß in den Schnitten zwischen den Nieten die gemessene Kraft fast mit der verbleibenden Kraft übereinstimmt. Daß jedoch die Spannungsfläche auf der Innenseite nicht mit derjenigen der Außenseite übereinstimmen kann, zeigt die Ueberlegung, nach der in der Mittelzone infolge der großen Lochpressungen noch Druckspannungen auftreten müssen.

Die Ergänzungskurven der Schnitte III, V, VII im Knotenblech entsprechen denjenigen aus der Ueberlagerung der Einzelbelastungskurven. Um die Figuren deutlicher zu halten, wurden nur einige beachtenswerte Zahlen eingetragen. Die in den Zahlentafeln angegebenen gemessenen σ_{max} beziehen sich nur auf diejenigen der zugänglichen Orte, wodurch bei der Lasche gezeigt werden soll, in welchem Mißverhältnis oft gemessene Werte der Außenseite zu den vorkommenden an der Innenseite stehen.

Zahlentafel 3. Kraft- und Spannungsverteilung an Lasche *B*.

Schnitt	F cm²	Kräfte in t: Reibung Nietkraft Σ = Bolzenkr.	Abbau	Verbleibende Kraft	gemessene Kraft	Ergänzung	Spannungen in kg/cm²: gemessene σ_{max}	mutmaßl. σ_{max}	rechnerisch σ_{mittel}	$\nu = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{mittel}}$
I	21,0	—	—	20,0	18,04	1,96	1000	1170	955	1,23
II	14,7	2,0 3,0 $\Sigma = 5,0$	2,0	18,0	11,92	6,08	880	1300 2700	1225	2,20
III	21,0	—	3,0	15,0	15,20	−0,20	892	920	715	1,29
IV	14,7	1,0 2,0 $\Sigma = 3,0$	1,0	14,0	10,58	3,42	704	1000 2100	952	2,21
V	21,0	—	2,0	12,0	11,44	0,56	696	700	572	1,22
VI	14,7	0,8 4,2 $\Sigma = 5,0$	0,8	11,2	8,50	2,70	560	900 1700	762	2,23
VII	21,0	—	4,2	7,0	7,64	− 0,64	442	500	334	1,49
VIII	14,7	1,1 5,9 $\Sigma = 7,0$	1,1	5,9	0,48	5,42	145	200 1400	402	3,48

Die Werte ν geben das Verhältnis zwischen den mutmaßlichen größten σ und den durch die gewöhnliche Berechnung sich ergebenden Mittelspannungen an. Sie sind nicht als genaue Werte zu betrachten und können besonders für die Schnitte durch die Löcher eher noch größer sein.[1])

Zahlentafel 4. Kraft- und Spannungsverteilung im Knotenblech *B*.

Schnitt	F cm²	Kräfte in t: Bolzen	Σ	gemessen	Spannungen in kg/cm²: gemessen σ_{max}	mutmaßl. σ_{max}	rechnerisch σ_{mittel}	$\nu = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{mittel}}$
III	12,0	—	5,0	—	740	—	416	1,78
IV	10,9	3,0	8,0	—	—	1500	734	2,04
V	14,9	—	8,0	—	825	—	537	1,54
VI	13,8	5,0	13,0	—	—	2000	943	2,12
VII	18,0	—	13,0	—	865	950	723	1,32
VIII	16,9	7,0	20,0	—	—	2700	1183	2,28
IX	20,9	—	20,0	—	910	1100	958	1,15
X	23,0	—	20,0	19,215	925	—	870	1,06

6. Einfluß der Durchbiegung der Gurtung auf das Knotenblech.

Infolge der Durchbiegung der Gurteisen erhalten die parallel zur Kraftrichtung wirksamen Gurt-Nietkräfte wagerechte Zusatzkomponenten, wodurch ein gewisses Biegungsmoment auf das Knotenblech übertragen wird. Dieses Biegungsmoment, als statisch unbestimmte Größe berechnet, ist bei einer Belastung von 20 t

138 cmt wenn Bolzen und Leibungsfläche starr,
2.3 cmt » » » » elastisch

[1]) Preuß gibt für ein unbelastetes Loch in einem Blech von konstanter Breite ein ν von 2,1 bis 2,3 an. (Forschungsheft Nr. 126.)

Rudeloff gibt für zwei nebeneinander stehende unbelastete Löcher in einem Blech von konstanter Breite ein ν von 1,3 an. (Versuche im Eisenbau Heft Nr. 1.)

Rühl gibt für ein durch einen Bolzen belastetes Loch in einem Blech von konstanter Breite ein ν von 2,82 an. (Forschungsheft Nr. 221.)

sind. Im ersten Falle müßte am unteren Rand im Schnitt 8 Fig. 14 bei einem Moment von 148 cmt, das sich zusammensetzt aus dem Moment ohne Einspannung und dem Zusatzmoment, eine Normalspannung von $+ 530$ kg/cm², im zweiten Falle bei 12,3 cmt eine solche von $+ 44$ kg/cm² entstehen, wobei geradlinige Spannungsverteilung über den ganzen Schnitt vorausgesetzt wird. Aus der gemessenen Randspannung von 700 kg/cm² in diesem Punkt ergibt sich im Schnitt 8, der mit dem Rand einen Winkel von 12° einschließt, eine Normalspannung von

$$700 \sin^2 12^0 = 28 \text{ kg/cm}^2.$$

Im gleichen Schnitt wurden noch Normalspannungen von 50 und 70 kg/cm² gemessen. Eine geradlinige Spannungsverteilung tritt demnach in den Schnitten parallel zur Kraftrichtung nicht ein, sondern sie richtet sich vorherrschend nach den Nietkräften der Anschlußlasche.

Im weiteren zeigt sich die Wirkung der Nietverformung in der Weise, daß das Knotenblech wenig vom Biegungsmoment der Gurtungen aufnimmt, was auch durch die Messungen bestätigt wird. Die im Kapitel III Abschnitt 5 über die Nietverformung gemachten Angaben können so angenähert als richtig angenommen werden.

7. Verlauf der Trajektorien.

In Fig. 16 sind die durch Messungen ermittelten Hauptspannungsrichtungen für verschiedene Knotenblechelemente eingezeichnet und durch mutmaßliche Trajektorien ergänzt worden. Alle die bestimmten Hauptzugrichtungen weisen auf den seilförmigen Verlauf der Zugtrajektorien hin, welche die Nietlöcher umfassen. Die Richtungen der Minimal-Spannungen gehen auf die Niete zu, entsprechend des radialen Verlaufs der Minimaltrajektorien, vom Nietzentrum aus. Da die gemessenen kleinen Hauptspannungen auch Zugspannungen sind, so wurde deshalb die Bezeichnung Minimal- statt Druck-Trajektorie angewendet. Infolge der großen Zugspannungen an den seitlichen Lochwandungen häufen sich dort die Zughauptlinien, die das betreffende Loch umgeben, an und werden dann durch die zusammenlaufenden Knotenblechränder leicht abgelenkt. Entsprechend dem fast gleichmäßigen Spannungsverlauf in den unverdeckten Knotenblechteilen der Schnitte III bis X verlaufen dort die Zugtrajektorien in gleichmäßigen Abständen. Beachtenswert ist, daß die durch die Nullpunkte S gehenden Zerfallinien die zu jedem Nietloch gehörigen Kraftliniensstränge umschließen und so voneinander trennen. Im Abschnitt 4 dieses Kapitels wurde erwähnt, daß der Abschlußpunkt der Druckzone um ein belastetes Loch mit dem Punkt S identisch ist. Während bei Einzelbelastung diese Zone über das darunter befindliche unbelastete Loch hinausreicht, ist dies nicht mehr der Fall, wenn dieses Loch in gleicher Richtung belastet ist, siehe Fig. 6, 12, 13 und 16.

Ueber die Zweckmäßigkeit der Knotenblechform gibt gerade der Trajektorienverlauf einen übersichtlichen Aufschluß. Die jedes Niet umgebenden Kraftzugstränge ordnen sich so an, daß sie ohne irgend welche Störung auf die Anschlußniete der Gurtung zulaufen und auch diese wieder umfassen können. Es ist ihnen so weit wie möglich Gelegenheit zum Ausgleich gegeben, mehr kann von einer guten Knotenblechform nicht verlangt werden.

Wie sich der Verlauf der Kraftlinien im Knotenblech unter der Gurtung gestaltet, wurde nicht untersucht. Er hängt von der Lage der Anschlußniete ab, die so anzuordnen sind, daß die auf sie zukommenden Kraftlinien in einfacher Weise aufgenommen werden können.

Abb. 15. Ansicht des Versuchsträgers mit Druckvorrichtung. Das auf dem Bilde sichtbare feste Lager wurde zur Vermeidung eines zweiten Fixpunktes im System nach den ersten Probeversuchen durch ein weiteres bewegliches Lager ausgewechselt.

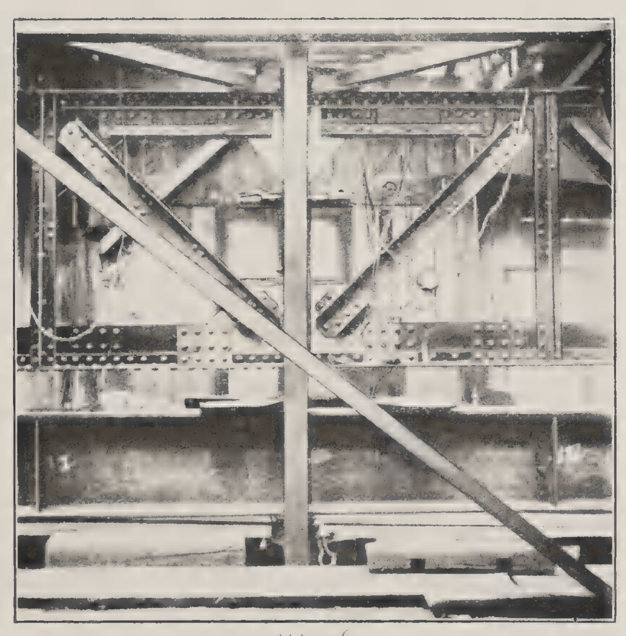
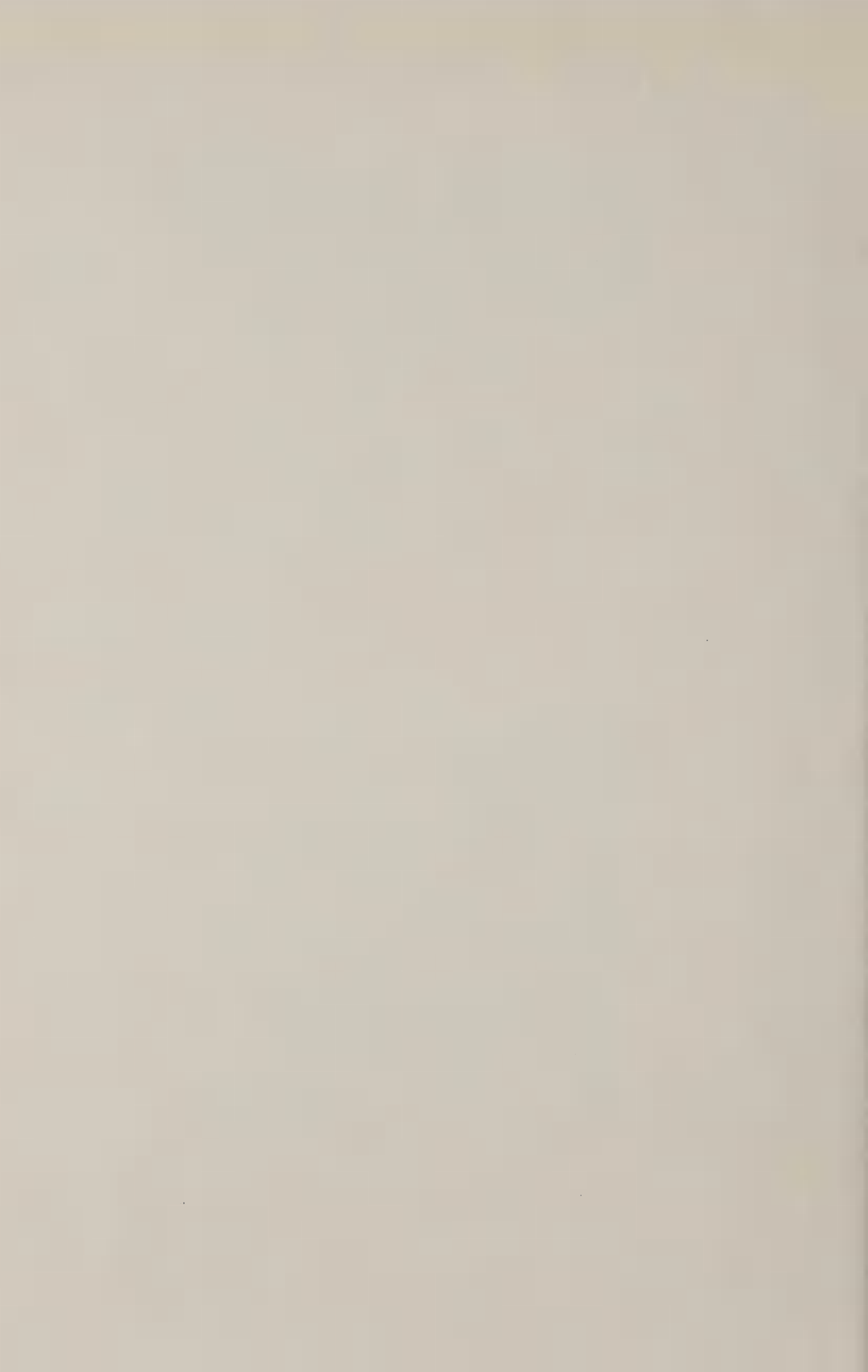


Abb. 16.
Ansicht des Probeträgers mit Druckrahmen, Magnetleitungen Meßbühne und Fachwerk zur Fixierung des Systems



Bis zu einem gewissen Konvergenzwinkel, den die Randlinien miteinander einschließen, wird der Kraftlinienverlauf günstig sein und dann bei weiterer Zunahme an Gleichmäßigkeit verlieren.

Beim Knotenblech *A* zeigen sich ähnliche Zustände wie bei *B*.

8. Allgemeine Folgerungen.

Die Vorversuche mit einem symmetrischen an einen auf Biegung beanspruchten Gurt angeschlossenen durch Zugkraft gespannten Knotenblech führen, kurz zusammengefaßt, zu folgenden Ergebnissen:

a) Die am Rande eines Loches, in welchem ein belastetes Niet steckt, auftretenden Höchstspannungen in den Schnitten senkrecht zur Kraftrichtung sind beim Knotenblech mindestens 2,2 mal größer als die nach gewöhnlicher Rechnung sich ergebenden mittleren Spannungen; außerhalb der Laschen ist in diesen Schnitten die Spannungsverteilung fast gleichmäßig.

b) Die Knotenblechform mit symmetrisch zur Kraftrichtung konvergierenden Rändern ist sehr geeignet als Anschlußform, indem sie einen gleichmäßigen, stufenweisen Kraftabbau in die Anschlußlasche ermöglicht.

c) Infolge der elastischen Verformung der Niete nimmt das Knotenblech wenig vom Biegungsmoment der Gurtung auf.

d) Die Stärken der Anschlußlaschen und die verwendeten Nietdurchmesser sollten in einem bestimmten Verhältnis stehen. Nach den erwähnten Untersuchungen über Nietverformungen sollte es 0,5 nicht übersteigen. Die hier verwendeten 15 mm starken Anschlußlaschen sind zu dick für Niete mit 21 mm Durchmesser.

e) Bei der Anschlußlasche sind die am Lochrand auftretenden Spannungen in Schnitten senkrecht zur Kraftrichtung mindestens 2,2 mal größer als die dortige mittlere Spannung. Diese Verhältnisziffer bezieht sich auf nur teilweise überwundene Reibung; bei völlig überwundener Reibung und geringer Steifigkeit des Nietschaftes kann sie sich noch bedeutend erhöhen.

f) Die Nietkräfte in der Anschlußlasche sind nicht alle gleich groß, was von den elastischen Verhältnissen von Knotenblech und Lasche herrührt.

V. Versuche mit dem Probeträger.

A. Allgemeines.

1. Der Probeträger. Zu Tafel 3.

Die Hauptversuche wurden an einem als einwandigen Brückenträger mit obenliegender Fahrbahn ausgebildeten Versuchskörper, Fig. 18, Abb. 15 und 16, Textblatt 1, ausgeführt, auf dem die Querträger so aufliegen, daß keine Zusatzspannungen infolge steifer Querträgeranschlüsse auftreten können. Seine Stützweite beträgt 6 m und die Systemhöhe 1,50 m. In diesen Träger wurden die zu vermessenden Knotenbleche eingebaut.

Als Gegenträger wirkt ein I 60 B und beide Träger sind umfaßt von einem Rahmen Fig. 17, der die Druckvorrichtung trägt. Hiermit wurde eine Belastung von 50 t ausgeübt. Wird dieser Rahmen von Knotenpunkt zu Knotenpunkt verschoben, so entspricht dieser Vorgang einer wandernden Belastung des Probeträgers. Es ist so die Möglichkeit vorhanden, Einflußlinien durch Messungen zu bestimmen. Die Lagerung des Rahmens ist so, daß möglichst Exzentrizitäten aus der Hauptträgerebene vermieden werden.

Seitlich wird der Probeträger durch einen Verband am Obergurt an senkrechte Stützen befestigt, Fig. 19. Dieser sichert ihn zugleich gegen Knicken. Als fester Punkt des ganzen Trägersystems ist der Mittelpunkt des Obergurtes zu betrachten, von dem aus sich der belastete Träger nach beiden Seiten ausdehnen kann. Dies wird durch Rollenlager an beiden Auflagerpunkten ermöglicht.

Die Auflager des Gegenträgers sind leicht gehalten, da sie nur das gesamte Eigengewicht beider Körper zu übertragen haben. Der durch die Druckvorrichtung ausgeübte Druck geht durch die Rollenlager. Damit sich der Träger I 60 B gut ausdehnen kann, ruht er nur auf zwei bombierten Flacheisen von 30 mm Dicke und wird gegen Kippen durch seitlich angebrachte Streben gehalten. Um Senkungen und Verschiebungen zu vermeiden, sind die beiden Auflagerkörper auf Betonfundamenten festgeschraubt. Zwischen diesen ist eine Grube ausgehoben worden, damit die Druckvorrichtung verschoben werden kann.

Die Profile am Probeträger sind so gewählt worden, wie sie in Minimalgrößen im Brückenbau noch vorkommen. Der Träger wird dadurch möglichst den praktischen Verhältnissen angepaßt und hat solche Abmessungen erhalten, daß bei der vorgesehenen Belastung keine Ueberschreitungen der Elastizitätsgrenze stattfinden. Die Knotenbleche sind 12 mm dick und ersetzen in den Knotenpunkten den Gurtsteg. Die Verbindung von Knotenblech und Gurtsteg geschieht durch Laschen auf dem unverdeckten Stehblech und auf den Gurtwinkeln. Die zwei weiteren Laschungen des Untergurtes sind zum Umbau des Trägers bestimmt.

Vermessen wurden die Knotenbleche am Mittelpfosten. Diese wurden aus 14 mm Blech auf das genaue Maß von 12 mm gehobelt und poliert. Für die Messungen wurden beidseitig sich deckende Risse in die Oberflächen eingeritzt, so daß quadratische Felder von 20 mm Seitenlänge entstanden. Die Anordnung der Netze ist in den Einzelzeichnungen der Knotenbleche dargestellt. Jedem Feld wurde eine Nummer zugeteilt, und diese wurde auch der zugehörigen Messung beigegeben.

Um an den Gurtungen, Laschen und Füllungsgliedern Messungen vornehmen zu können, wurden auch die Flächen dort soweit nötig poliert und darauf Risse angebracht. Zwischen Diagonalen und Pfosten ist ein 30 mm breiter Knotenblechstreifen freigelassen worden, um möglichst an diesen Stellen das Knotenblech vom Rand bis zu den Gurtwinkeln vermessen zu können. Diese Zwischenräume sind demnach absichtlich hergestellt worden und müßten bei gewöhnlichen Konstruktionen aus Steifigkeitsgründen verschwinden.

Um den Messungen an Knotenblechen einen allgemeinen Wert zu verleihen, ist die Konstruktion des Probeträgers so ausgeführt worden, daß das einfache Strebensystem in ein Pfostensystem verwandelt werden kann, Fig. 22. Zur Spannungsuntersuchung gelangten:

a) Knotenpunkt 4 *A* und 4 *A'*, Fig 18 und 20, als Beispiele eines gewönlichen Strebenfachwerks mit Hülfsvertikalen. Bei Knotenblech 4 *A* ist die Form eine gedrängte, bei 4 *A'* ist sie erweitert, und die Diagonalanschlüsse sind durch seitliche Winkel verstärkt. Die 50 t-Last wirkte in Punkt 3 (Belastungsfall 1) und dann in Punkt 1 (Belastungsfall 2).

b) Knotenpunkt 3 *A* und 3 *A'*, Fig. 18 und 20, als Bauarten eines einfachen gedrückten Mittelpfostenanschlusses. Bei Knotenblech 3 *A* wirken zehn und bei 3 *A'* zwölf Pfostenanschlußniete. Die oberen Blechkanten sind gehobelt, damit ein Teil der auf dem Gurt angebrachten Last unmittelbar aufgenommen werden kann Vermessung im Belastungsfall 1 und 2.

c) Knotenpunkt 4 *B*, Fig. 22, als Beispiel eines gewöhnlichen Ständerfachwerkes. Vermessung im Belastungsfall 1.

d) Sämtliche Stabanschlüsse zur Bestimmung der Stabkräfte, Momente und Nietkräfte. In einzelnen Fällen wurden auch die Kräfte und Momente in Stabmitte festgestellt. Um den großen Spannungsunterschieden zwischen Außen- und Innenseite auszuweichen, wurden die zu vermessenden Schnitte durch die Stabanschlüsse zwischen die Anschlußniete gelegt, wo sich nach den Vorversuchen bereits ein teilweiser Spannungsausgleich zeigt.

Im weiteren wurden die Drehwinkel an verschiedenen Stellen der Stäbe und Knotenbleche für beide Belastungsfälle und beide Trägerbauarten gemessen.

Alle übrigen Teile des noch verbleibenden Trägers *B* können zu weiteren Untersuchungen verwendet werden.

Die Konstruktionen wurden mit möglichster Sorgfalt hergestellt. Die Löcher wurden zuerst kleiner vorgebohrt und erst beim Zusammenpassen voll ausgebohrt. Sämtliche Niete wurden hydraulisch genietet, wodurch volle Gewährleistung für gutes Sitzen und gleichmäßiges Arbeiten gegeben wurde. Beim Umbau wurden die Setzköpfe der zu lösenden Nieten weggebohrt, was ohne Schwierigkeiten gelungen ist. Einem Verlaufen des Bohrers wurde dadurch vorgebeugt, daß zunächst mit einem Bohrer kleineren Durchmessers vorgebohrt wurde. Beschädigte Teile wurden durch neue ersetzt.

Die Abmessungen der Querschnitte, in denen die Stabkräfte ermittelt werden sollten, wurden nach Möglichkeit auf $^1/_{10}$ mm genau festgestellt. Da während des Krieges dem genauen Arbeiten der Walzen keine große Aufmerksamkeit geschenkt wurde, so zeigten die einzelnen Profile oft bedeutende Abweichungen vom gewöhnlichen Querschnitt.

2. Versuchseinrichtung.

Der Versuchsträger wurde in einem alleinstehenden Holzschuppen der Eisenbauwerkstätte Döttingen, in der er hergestellt wurde, aufgestellt. Es war dadurch die Möglichkeit geboten, den Umbau ohne große Transporte vorzunehmen.

Als Druckvorrichtung diente eine hydraulische Presse mit 150 t Höchstdruck. Um einer großen Abnutzung vorzubeugen und um die Bedienung derselben in erträglichen Grenzen zu halten, wurde jedoch nur ein höchster Druck von 50 t ausgeübt. Die Pumpe wurde von Hand bedient. Als Druckmesser diente ein Manometer. Die vorgenommene Prüfung von Manometer und Druckvorrichtung in der Materialprüfungsanstalt in Zürich ergab, daß die erforderlichen 50 t Druckkraft bei 140 at erreicht wurden. Die durch die Dichtungsringe erzeugten Reibungskräfte, die mit dem Gebrauch abnehmen, konnten nicht groß sein, da der Druckkolben schon aus Eigenlast auf die Nullstellung zurückging. Die Gleichmäßigkeit des Druckes und das elastische Verhalten des Trägers selbst zeigten auch die 1″ genauen Klinometer an, indem bei wiederholter Belastung und Entlastung in vielen Fällen genau die entsprechenden Werte sich wieder ergaben.

Es soll noch die Verwendung der vier Elektromagnete, eine Erfindung von Herrn Brückeningenieur Bühler zur Befestigung der Meßapparate an Knotenblechen, erwähnt werden. Sie wurden mit Gleichstrom von 8 bis 20 V, der durch den Leerlauf einer alten Gleichstrommaschine erzeugt wurde, gespeist. Der Wechselstrom der Beleuchtungseinrichtung konnte nicht verwendet werden. Jeder Magnet konnte für sich ein- und ausgeschaltet werden. Um ein Herunterfallen der Magnete und Meßgeräte bei Stromunterbrechung zu verhindern, wurden unter

denselben besondere Bühnen angebracht. Zudem wurden die Magnete noch an Drähten aufgehängt, um einer Beschädigung der Meßapparate vorzubeugen. Bei irgendwelchen Veränderungen an den Dehnungsmessern wurden die betreffenden Apparate solange nicht wieder verwendet, bis die neuen Dehnungsbeiwerte im Amt für Maß und Gewicht in Bern von neuem bestimmt waren. Während der ersten Versuchszeit stellte mir das Brückenbureau der Generaldirektion der schweizerisehen Bundesbahnen ihre Elektromagnete in verdankenswerter Weise zur Verfügung.

3. Vorversuche.

Das Hauptgewicht wurde hierbei auf die Bestimmung des ersten Verlaufes der Verformung gelegt. Hierzu wurden Durchbiegungs- und Winkeländerungs-

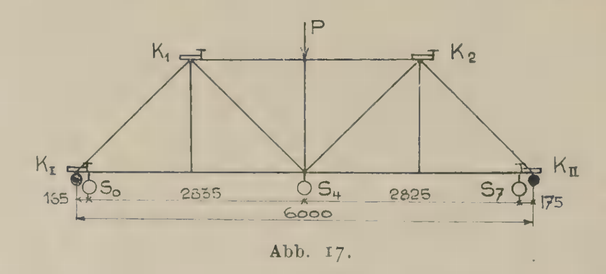


Abb. 17.

messungen vorgenommen, die hier angeführt werden sollen. Die Anordnung der Meßgeräte ist aus Abb. 17 ersichtlich.

Beim Belastungsvorgang wurden folgende Drücke in at ausgeübt:

0—20—80—140—20—80—140—20—80—140—20—80—140—20—0.

Zahlentafel 5.

Ablesungen bei den Durchbiegungsmessungen in mm 10^{-2}.

Druck at	Punkt S_0					Punkt S_4					Punkt S_7				
	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5. Versuch
0	8,0	—	—	—	21,0	27,0	—	—	—	100,0	47,0	—	—	—	68,5
20	9,0	36,0	38,0	38,0	37,0	100,0	176,0	166,0	157,0	157,0	96,0	115,5	117,5	116,5	114,5
80	46,5	62,0	63,0	63,0	—	272,0	321,0	309,0	301,0	—	139,0	146,5	147,5	146,5	—
140	84,0	86,0	86,0	86,0	—	421,0	421,0	421,0	421,0	—	167,5	169,0	168,5	168,0	—
Bleibende Durchbiegung	$\frac{1}{100} \cdot 13 = 0{,}13$ mm					$\frac{1}{100} \cdot 73 = 0{,}73$ mm					$\frac{1}{100} \cdot 21{,}5 = 0{,}215$ mm				

Zahlentafel 6.

Ablesungen bei den Drehwinkelmessungen.

Druck at	Klinometer K_I					Klinometer K_1					Klinometer K_2				
	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5. Versuch
0	76,0	—	—	—	115,0	24,5	—	—	—	38,5	115,0	—	—	—	96,0
20	90,0	134,0	137,0	137,0	137,0	40,0	53,0	55,0	55,0	54,5	107,0	87,0	84,5	84,0	84,5
80	146,5	170,0	173,0	174,0	—	80,5	89,0	91,0	90,0	—	66,0	51,0	49,5	49,0	—
140	205,0	207,0	208,0	208,0	—	126,5	127,0	128,0	127,0	—	13,0	12,0	10,5	10,5	—
Bleibende Verdrehung	$39 \cdot 3{,}02 = 118''$					$14{,}0 \cdot 4{,}30 = 60''$					$-19 \cdot 4{,}30 = -82''$				

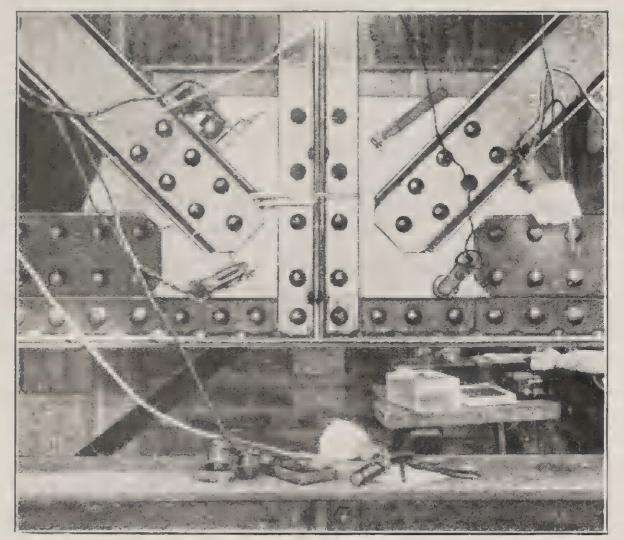


Abb. 18. **Knotenpunkt 4 *A* mit befestigten Meßgeräten.**

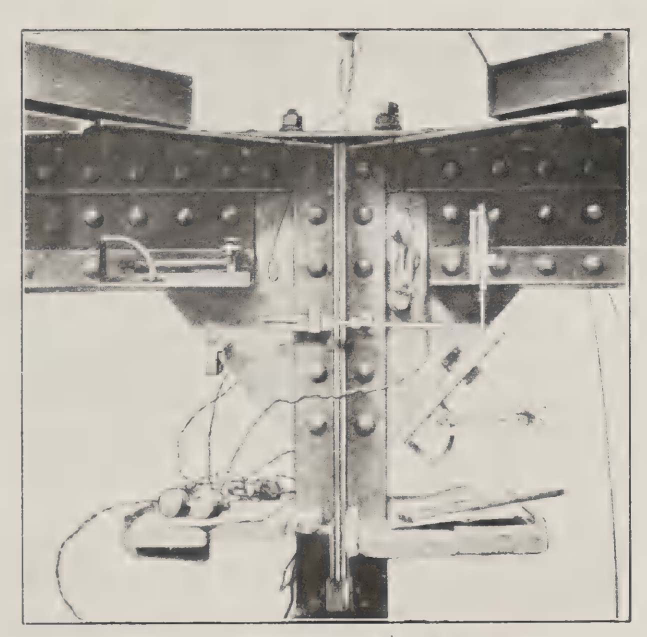
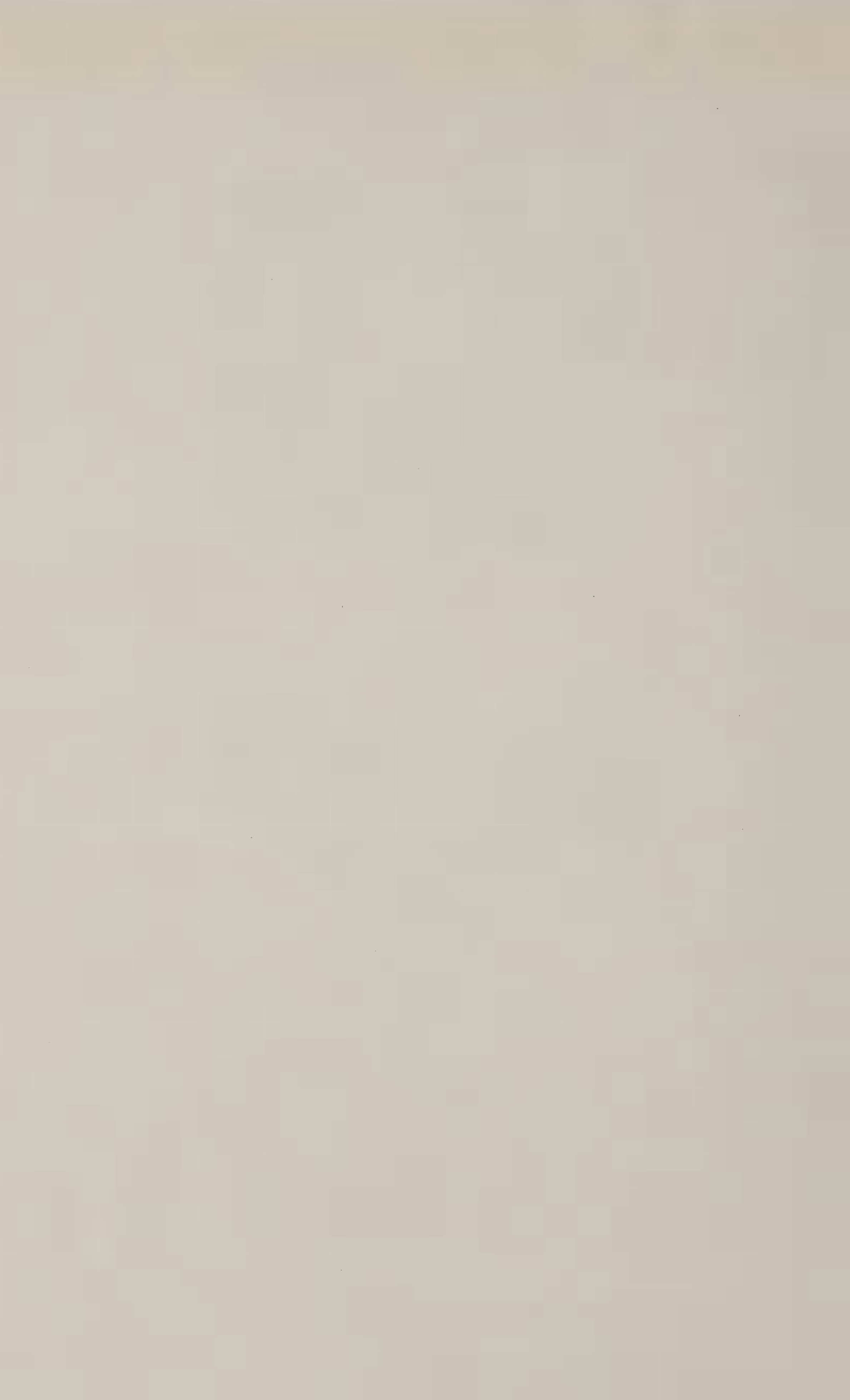


Abb. 19. **Knotenpunkt 3 *A'* mit Meßbühne.**



Die Messung mit Klinometer K_{II} entspricht der mit K_I und ergab eine bleibende Verdrehung von —76″. Bei Durchbiegungsmesser S_4 fand eine Berührung des Apparates durch den sich nach oben durchbiegenden Träger *I* 60 *B* statt, wodurch die Ergebnisse sich änderten. Bei sämtlichen Messungen kann jedoch festgestellt werden, daß die Ablesungen bei den Drücken von 0—80 at Manometerablesung im ersten Belastungsvorgang kleiner sind als in den späteren, während bei 140 at = 50 t der Ablesewert sich fast nicht änderte. Der Träger arbeitet somit nach Ueberwindung der Reibungskräfte ganz gleichmäßig, was schon bei der ersten Belastungsvornahme zwischen 80 und 140 at stattfindet. Nach vielen weiteren Versuchen, die etwa 8 Tage dauerten, wurde mit den eigentlichen Messungen begonnen.

B. Versuche am Knotenblech 4 A (Tafeln 4 bis 8).

1. Belastungsfall 1 (Last von 50 t in Punkt 3, Abb. 15).

a) Das Knotenblech.

Die allgemeine Konstruktion ist in Fig. 23, ferner in Abb. 18, Textblatt 2, dargestellt, in die auch die eingeritzten Felder für die Messungen eingezeichnet sind. Ueberall, wo gemessen werden soll, sind die Konstruktionsteile poliert. Das Knotenblech ist 12 mm dick. Zu erwähnen ist, daß das Gurtstehblech durch je zwei Laschen 170 × 8 und 70 × 8 an das Knotenblech angeschlossen ist, während die Gurtwinkel ungestoßen durchgehen. Die genauen Abmessungen der Profile weichen etwas von den gewöhnlichen Maßen ab, was bei der Berechnung der Stabkräfte und Momente aus den gemessenen Spannungen zum Ausdruck kommt.

Die Trajektorien in Fig. 23 ergeben sich aus den nach Kap. III Abschnitt 3 für die verschiedenen Elemente ermittelten Richtungen der Hauptspannungen. Diese Kurven sind nun in den verdeckten Knotenblechteilen nach Gutdünken ergänzt worden, wobei die im Abschnitt über Trajektorien sich ergebenden Gesichtspunkte berücksichtigt wurden. Außer einigen schwierigen Partien in den Laschenteilen ergibt sich der Verlauf der Ergänzungskurven fast ohne weiteres aus den durch die Messungen ermittelten Teilstücken. Infolge der symmetrischen Belastung ist auch der Verlauf der Kraftlinien zur Pfostenaxe symmetrisch; es wurde daher nur die eine Knotenblechhälfte dargestellt.

Die Zugtrajektorien bilden verschiedene in sich geschlossene Systeme. Das eine umfaßt die drei Anschlußniete der Diagonalen über der Stabachse, das andere die Niete unterhalb der Stabachse. Um die einzelstehenden Schlußniete geht ein dritter Strang von Zugkraftlinien. Alle diese Kraftlinien nehmen die Form von Seillinien an, die die Pfostenlast aufnehmen. Hierbei soll noch auf die Rolle, die der letzte Anschlußniet der Diagonale spielt, hingewiesen werden, indem durch ihn die Kraftlinienstränge der vorgehenden Niete nach beiden Seiten abgelenkt werden. Vom Gesichtspunkte möglichst ungestörten Kraftflusses aus wäre es so besser, zwei Niete zu setzen, die in die Streichlinien der vorgehenden Niete zu liegen kommen.

Weitere Kraftliniensysteme werden durch die Laschenanschlüsse gebildet. Sehr deutlich ist in *E* der Trennpunkt gekennzeichnet, wo die eine Zugtrajektorie nach der Diagonale abschwenkt und die andere auf die Lasche zugeht. Die beiden oberen Laschenniete nehmen die durch das Einspannmoment der Gurtung verursachte Druckkraft auf. Sie werden daher gegen die Pfostenseite zu von Zugtrajektorien umfaßt. Die beiden unteren Laschenniete scheinen mit zwei Gurtnieten ein Kraftsystem zu bilden, d. h. es wird die durch die

Steglasche abgehende Zugkraft vermittelst des Knotenbleches auf die Gurtwinkel übertragen. Eine weitere Kraftabgabe an das Knotenblech findet durch die zwei Niete der Laschen 70 × 8 statt. Nach unseren Annahmen würden diese am einen Stoß mit denen des anderen Stoßes ein zusammenhängendes System bilden. Diese Annahmen müssen noch durch besondere Untersuchungen bestätigt werden. Auf alle Fälle ist klar zu erkennen, daß der größte Teil des Knotenbleches zum Ausgleich der Diagonalkräfte dient und nur ein kleiner Teil die Uebertragung der im Gurtstehblech befindlichen Kräfte bewerkstelligt. Es ist notwendig, daß die Gurtwinkel noch an dieser Uebertragung teilnehmen, was durch die Steigerung der Spannung in denselben kenntlich gemacht wird.

Die größten gemessenen Hauptspannungen sind am Ende der Diagonale und betragen 1034 kg/cm² und 937 kg/cm². Sie werden gegen das letzte Anschlußniet zu noch bedeutend zunehmen. Der Verlauf der Schubtrajektorien wurde nicht eingezeichnet. Es ist leicht, ihren Verlauf aus den gezeichneten Hauptspannungslinien abzuleiten.

In der Fig. 24 ist der Verlauf der Normal- und Schubspannungen für wagrechte und senkrechte Schnitte durch das Knotenblech dargestellt. Die Zugspannungen in den senkrechten Schnitten wachsen gegen den Mittelpfosten zu infolge der Einwirkung der Diagonale an. Hiervon wurde der Schnitt F besonders herausgezeichnet und die Normalspannungskurven beider Seiten dargestellt. Sie weichen an verschiedenen Stellen voneinander ab, wodurch auf Verbiegen des Knotenbleches geschlossen werden kann. Gewöhnlich zeigt sich bei einer größeren Ausbuchtung der Kurve auf der einen Seite eine eben so große Einbuchtung auf der anderen Seite. Hierdurch ergibt sich die Neutrallinie als eine stetige Kurve und die scheinbaren Meßfehler haben ihre Berechtigung. In diesem Schnitt wurde unter Berücksichtigung der mutmaßlich gezeichneten Spannungsfläche unter den Gurtwinkeln eine Zugkraft von 21,73 t festgestellt. Es ist zu betonen, daß der Normalspannungsverlauf in keinem Schnitt geradlinig ist und so zwischen Theorie und Wirklichkeit immer mehr oder weniger große Abweichungen vorkommen müssen.

Der Normalspannungsverlauf im Schnitt F_a ist mutmaßlich, er kann unter Vernachlässigung der Reibungskräfte zwischen Knotenblech und Mittelpfosten infolge dessen Anschlußniete angenähert ermittelt werden, indem die Normalkraft in diesem Schnitt gleich der in F sein muß und das Moment in F_a sich aus der Kenntnis der Querkraft und des Momentes in F ergibt. Sehr unsicher sind jedoch die zu dem 1,5 fachen der dort gemessenen normalen Spannungen angenommenen Lochrandspannungen. Es wurde dieser Beiwert gewählt, weil er angenähert für Lochrandspannungen an solchen Stellen stimmen wird, wo keine in dieser Richtung belastete Bolzen im Loch wirken. Infolge der starken Pfostenbelastung werden die größten Nietkopfpressungen als Folge der Nietschaftverformung in der Zone unterhalb der Nietlöcher vorkommen, währenddem sie über den Nietlöchern geringe Werte annehmen.

Die wagrechten Schnitte unterhalb der Diagonale weisen Zugspannungen auf. In den Teilen nahe am Pfosten treten Druckspannungen auf, die ihren Höchstwert unter den Pfostenanschlußnieten haben.

Die Schubspannungen in den senkrechten Schnitten nehmen gegen den Pfosten hin zu, entsprechend der durch die Anschlußniete auf das Knotenblech

übergeleiteten Kräfte. Beachtenswert ist, daß die Spannungsverteilung im Schnitt F nach einer Parabel verläuft und damit der Theorie ziemlich nahe kommt. Es wurde dort eine Querkraft von 19,41 t unter Einrechnung der Ergänzung unter den Gurtwinkeln ermittelt.

Die Schubspannungen im Schnitt F_a sind an jedem Lochrand Null. Die Summe der Schubspannungen muß gleich der im Schnitt F_a wirkenden Scherkraft sein. Diese ist gleich der Scherkraft im Schnitt F vermindert um die Hälfte der im Schnit F_a auftretenden Nietkräfte. Man wird nicht sehr fehl gehen, wenn man auch im Schnitt F_a die Größtwerte der Scherspannungen in den Mittelteilen des Knotenbleches annimmt.

In Fig. 25 sind die Spannungsverteilungen in den Diagonalschnitten dargestellt. Die Wirkung von Pfosten und Diagonalen kommt in den Normalspannungen sehr schön zum Ausdruck. Die Ergänzung der Normalspannungslinien in den Schnitten senkrecht zur Diagonalachse wurde so bestimmt, daß die von ihnen eingeschlossene Spannungsfläche gleich ist der durch die Niete abgegebenen Kraft, vermindert um die Scherkräfte in den Schnitten m und n. In den bereits bei der Beschreibung des Trajektorienverlaufes als ungünstig beansprucht bezeichneten Partien um das letzte Anschlußniet der Diagonale herum ergaben sich Spannungen von 1400 kg/cm², die am Lochrand noch bedeutend größer sein können.

Im Schnitt m, parallel der Diagonalachse, ist die Scherspannung fast konstant und desgleichen für alle Schnitte oberhalb m. Der Schnitt n weist in der Scherspannung einen Wechsel auf, entsprechend der veränderten Belastung im Vergleich zum Schnitt m. Zur Verdeutlichung wurden Normal- und Scherspannungskurven für den Schnitt R besonders herausgezeichnet, in denen wieder die Verbiegung des Knotenbleches zum Ausdruck kommt. Sie geben auch einen Anhaltspunkt über die Größe der vorkommenden Spannungen, indem es nicht möglich ist, überall die bestimmten Spannungszahlen einzuschreiben.

b) Stabkräfte und Momente.

In Fig. 26 sind die Spannungsverteilungen in den Stäben dargestellt. Es wurden keine Querdehnungen gemessen; die ermittelten Spannungen sind daher mit kleinen Fehlern behaftet.

Am Pfosten wurde im äußeren Schnitt eine Druckkraft von 41,54 t ermittelt. Die Spannungen in den abstehenden Winkelschenkeln sind mit 578 kg/cm² Druck bedeutend kleiner als in denen, die am Knotenblech anliegen und mit 830 kg/cm² beansprucht werden. Für den Schnitt nach den ersten Anschlußnieten ändert sich das Spannungsverhältnis. Die abstehenden Winkelschenkel werden immer noch mit 522 kg/cm² auf Druck beansprucht, die angenieteten Schenkel nur bis zu 243 kg/cm². Erst durch das zweite Nietpaar wird die Kraft in den abstehenden Schenkeln abgebaut. Der genau gleiche Vorgang zeigt sich auch bei den Diagonalen. Es werden durch die Niete immer die ihnen am nächsten liegenden Kräfte zuerst abgeleitet und dann die entfernteren. Man muß sich darüber klar sein, daß infolge der Nietverformung die Spannungen auf der Innenseite nicht gleich den gemessenen an der Außenseite sind. Um nicht zu große Unterschiede zu bekommen, wurden daher die Schnitte zwischen die Niete gelegt, wo bereits ein gewisser Ausgleich stattgefunden hat. Es wäre vielfach auch unmöglich gewesen, bei den Nietköpfen mit den Meßapparaten zuzukommen. Der Pfosten weist eine etwas unsymmetrische Belastung auf, wodurch die ersten Anschlußkräfte verschieden groß sind, sie haben 9,40 t

und 6,40 t. Diese ungleiche Beanspruchung des Knotenbleches kommt dann bei den Drehwinkeln sehr schön zur Geltung Fig. 66 Tafel 14. Die Nietkräfte ergeben sich aus dem Unterschied der Kräfte zweier aufeinanderfolgender Schnitte. Außer den beiden ersten Anschlußnieten des Pfostens, die am stärksten beansprucht sind, haben die anderen unter sich fast die gleiche Nietkraft von 3,0 bis 4,5 t Selbst die zwei letzten Niete arbeiten noch voll mit.

Auch bei der Diagonale weisen die abstehenden Flansche der [-Eisen im äußeren Schnitt geringere Beanspruchungen auf als der Steg. Es wurde dort eine Kraft von + 28,86 t und ein Moment von 13,18 cmt gemessen. Die Spannungsfläche ist durch Kurven und nicht wie in der Theorie durch Gerade begrenzt. Die größte Spannung tritt am Steg auf. Beachtenswert ist das Arbeiten des letzten Anschlußnietes, das im letzten Schnitt eine besonders geformte Spannungsfläche erzeugt. Es muß betont werden, daß sämtliche Schnitte so vermessen wurden, wie dies bei den Außenschnitten der Fall ist. Die Spannungszahlen wurden jedoch nicht in die Zeichnung eingetragen, um diese deutlicher zu halten. Die Nietkräfte der Diagonale wurden bei ihrer Bestimmung als elastische Stützenkräfte eines kontinuierlichen Balkens betrachtet. Hiervon sind in den Feldmitten die Momente durch Messung ermittelt worden. Der Nullpunkt der Diagonale kann aus den Drehwinkelmessungen, siehe Tafel 14, bestimmt werden. Hierdurch ist es möglich, die Querkraft in der Diagonale zu berechnen. In der Fig. 26 ist der Momentenverlauf eingezeichnet worden, in den die gemessenen Momente sich gut einfügen. Hieraus ergeben sich die senkrecht zur Stabachse gerichteten Nietkräfte. Vielfach findet ein stufenweiser Abbau der Einspannmomente statt, was davon herrührt, daß jedes Nietpaar außer den seitlichen Kräften noch ein Moment aufnimmt. In diesem Fall ist die Diagonale als kontinuierlicher Balken auf elastisch drehbaren uud senkbaren Stützen zu betrachten, z. B. Fig. 34, Knotenblech 4 A, Belastungsfall 2.

Am Untergurtstab wurde in Stoßmitte eine Kraft von 24,93 t und ein Moment bezüglich der Zentrierachse von 106,5 cmt gemessen. In sehr schöner Weise zeigt sich in Fig. 26 die Wirkung dieses Momentes. Der Verlauf der Spannungslinie ist so, daß man einen ungeteilten Stehblechstoß vor sich zu haben glaubt. Der Kraftabbau in den Laschen zeigt sich beim Vergleich der beiden durch sie gelegten senkrechten Schnitte. Ueber die schon erwähnte Zunahme der Spannungen in den Gurtwinkeln und der Lamelle gegen den Mittelpfosten zu geben die verschiedenen Messungen Aufschluß. Die Abnahme der Spannungen am oberen Rand der Gurtwinkel im Bereich des Mittelpfostens und die bedeutende Spannungszunahme am unteren Rand derselben, sowie in der Lamelle, läßt auf sekundäre Biegungen in diesem Gurtteil durch den Mittelpfosten schließen.

Im Schnitt *k* Fig. 26 ergibt sich eine Kraft von 44,64 t d. h. 22,91 t von der Gurtung und 21,73 t vom Knotenblech und ein Schwerpunktsmoment von 305,9 cmt. Ueber den Zusammenhang zwischen diesen Kräften und Momenten mit den Außenkräften gibt die Zahlentafel zu Fig. 28 Aufschluß. Die sich ergebenden Fehler sind als klein zu bezeichnen, wenn man bedenkt, welche Schwierigkeiten sich bei der Ausführung der Messungen zeigten und welchen Einfluß die Verformung der Niete ausübt.

Der Spannungsverlauf im Grundriss der Gurtung ist abgesehen von den eingeschriebenen Spannungen schätzungsweise angenommen worden. Die Spannungen am Lochrand des Schnittes durch den Stehblechstoß sind gleich der 1,5 fachen mittleren Spannung gesetzt worden.

c) Statische Untersuchungen.

Aus der Gleichgewichtsuntersuchung der äußeren Kräfte am Knotenpunkt kann die Querkraft im Untergurtstab bestimmt werden. Es muß sein

$$Q = \frac{41{,}54}{2} + 0{,}915 \cdot 0{,}707 - 28{,}86 \cdot 0{,}707 = 1{,}02 \text{ t}.$$

Eine genaue Berechnung von Q ist schwierig, weil die Fehler, mit denen die einzelnen Meßwerte behaftet sind, größer sein können, als es diese Querkraft selbst ist. Nach dem Mohrschen Verfahren, Tafel 15, würde $Q = 1{,}11$ t und bei elastischen Knotenblechen $Q = 1{,}45$ betragen. Durch diese theoretische Nachrechnung ist es möglich, die Meßergebnisse auf ihre Zuverlässigkeit hin einigermaßen zu prüfen. Einen Teil dieser Querkraft nehmen die Gurtwinkel am Stoß auf. Dies ist in noch vermehrtem Maße der Fall in der Zone der durch den Pfosten erzeugten Zusatzbiegung. Aus diesem Grunde beträgt die Querkraft im Schnitt F des Knotenbleches nur 19,45 t statt der durch die äußeren Kräfte ermittelten 20,77 t.

Es wurden verschiedene Gleichgewichtsuntersuchungen an Knotenblechteilen und Stabanschlüssen vorgenommen, wovon nur die in Fig. 27 und Fig. 29 ermittelten Ergebnisse angeführt werden sollen. In Fig. 27 muß die äußere Diagonalkraft und das Moment im Gleichgewicht sein mit den Kräften am Knotenblechausschnitt, begrenzt durch die Schnitte m, n, R. Wie weit diese Messungen die Bedingungen erfüllen, geht aus den angegebenen Daten hervor. In Fig. 29 ist der Spannungszustand eines Diagonalelementes A untersucht. Zur einfacheren Berechnung wurden die Seiten zu 2,0 cm und die Dicke auf 1,0 cm angenommen statt der 2,82 cm Seitenlänge und der Dicke von 1,20 cm. Die an den vier Ecken eingeschriebenen Spannungen entsprechen denjenigen der vier Mittelpunkte der normalstehenden Elemente. Die zugehörigen Spannungen einer Seitenfläche wurden geradlinig verbunden. Durch die Schraffuren dieser Spannungsflächen läßt sich der Spannungszustand sehr schön darstellen, und es ist hieraus ersichtlich, wie das Knotenblech seitlich ausbiegt. In der einen Diagonalrichtung ergibt sich bei Berücksichtigung der Spannungen beider Außenseiten statt null eine Kraft von 31 kg und in der anderen Diagonalrichtung ein Kraftfehler von 17 kg. Bezüglich des Momentengleichgewichtes um den Punkt S tritt ein Momentenfehler von 3 cmkg auf. Eine ganze Anzahl solcher Diagonalelemente wurde auf ihren Gleichgewichtszustand untersucht und hierbei ähnliche Verhältnisse gefunden.

Zur späteren Erläuterung der Verformung der Knotenpunkte und der Entstehung der Nebenspannungen wurden in Fig. 28 die Kraftachsen bezüglich der Zentrierachsen und die Schwerpunksmomente für senkrechte Schnitte durch Gurtung und Knotenblech dargestellt.

Die Momente der Stabkräfte bezüglich der Zentrierachse heißen Zentriermomente. Durch Messungen können sie an den Stäben nur außerhalb der Anschlüsse an das Kontenblech bestimmt werden. Im Bereich des Knotenbleches selbst haben sie nur theoretischen Wert, indem dann dieses als unendlich kleiner Punkt im Zentrierpunkt gedacht werden muß. Die Zentriermomente M_z sind von Bedeutung für die Berechnung der Einspannmomente der Stäbe, worauf später eingetreten werden soll. Kap. VI, Abschnitt 3.

Die Schwerlinie als Verbindungslinie der Schwerpunkte sämtlicher senkrechter Schnitte ist bei zusammengesetzten unsymmetrischen Stäben eine Wellenlinie, indem die Schwerpunkte infolge der wechselnden Nietabzüge beständig sich verschieben. Bei Laschen verläuft sie sprungweise je nach den Anschlußnieten. Es ist daher immer ein Unterschied zu machen zwischen Schwerlinie

und Zentrierlinie. Je nach der Abweichung dieser beiden Linien entstehen Zusatzmomente, die eine Veränderung der Spannungsverhältnisse hervorrufen. Bei der Bestimmung der Schwerpunktsmomente wurde in unserem Falle eine ideelle Schwerlinie angenommen und hierauf für jeden senkrechten Schnitt die zugehörigen am Knotenpunkt angreifenden äußeren Kräfte bezogen. Zur Vereinfachung wurden die Anschlußnietkräfte der Diagonale in deren Achse zusammengefaßt gedacht. Die in den Schnitten F und F_a, Fig. 28, gemessenen Momente M_s weichen nicht stark von den so gerechneten Schwerpunktmomenten ab. Es ist im

Schnitt F: $M_s = 305{,}9$ cmt gemessen und $291{,}9$ cmt gerechnet
und im Schnitt F_a: $M_s = 417{,}9$ cmt gemessen und $405{,}3$ cmt gerechnet.

Aus diesen Ergebnissen ist nicht zu verkennen, daß ganz bedeutende Biegungsmomente infolge steifer Knotenbleche und infolge Abweichung von der Schwerachse und Zentrierachse entstehen. Es ist auch klar, daß diese Schwerpunktmomente auf die Verformung der Knotenbleche und des ganzen Knotenpunktes einen großen Einfluß ausüben.

2. Belastungsfall 2. Last von 50 t in Punkt 1. Fig. 30, Tafel 6.

a) Das Knotenblech ist in diesem Belastungsfall unsymmetrisch belastet. Die eine Diagonale ist gedrückt, die andere gezogen; der Pfosten weist ein Biegungsmoment auf; der Gurtstab unter der Druckdiagonale ist stärker beansprucht als der unter der Zugdiagonale. Dieser Belastungszustand kommt im Trajektorienverlauf, Fig. 30, klar zum Ausdruck. Der größte Teil der Zugtrajektorien verbindet die Anschlußniete der Zugdiagonale mit den Laschen und Gurtwinkelnieten des stärker gezogenen Untergurtstabes. Auch hier haben sich wieder verschiedene seilförmige Kraftliniensysteme gebildet, die einzelne Nietgruppen umfassen und infolge der Einwirkung der Druckdiagonale nach unten gekrümmt sind. Eine Störung im Kraftfeld wird oben durch die Anschlußkräfte des Pfostens verursacht. Der Trajektorienverlauf in dem durch die Gurtwinkel verdeckten Knotenblechteil konnte nicht völlig geklärt werden und wurde daher weggelassen. Im allgemeinen stimmt das Kraftlinienbild der Knotenblechhälfte, an der die Zugdiagonale angreift, mit demjenigen im Belastungsfall 1 überein. Grundsätzlich verschieden ist der Trajektorienverlauf im Bereich der Zug- und Druckdiagonale, und man kann sich so leicht ein Bild vom Arbeiten des Materials bei Zug und darauffolgender Druckwirkung machen.

Die Normalspannungen in den senkrechten und wagerechten Schnitten sind in Fig. 31 dargestellt. Die linke Knotenblechhälfte weist eine ähnliche Spannungsverteilung auf, wie dies beim Belastungsfall 1 der Fall war. In der rechten Hälfte macht sich die Druckwirkung der Diagonale geltend. Lehrreich ist der Spannungsverlauf am oberen Knotenblechrand, wo sich besonders das Biegungsmoment des Pfostens geltend macht. Hier treten auch seitliche Verbiegungen auf. Der Vergleich der herausgezeichneten Spannungsverteilungen in den Schnitten F und G zeigt deutlich das Aufwärtswandern der Zugkräfte nach der Diagonale zu und den Abbau der Kräfte aus den Gurtwinkeln, indem der Schnitt F eine Kraft von 10,35 t und der Schnitt G eine von 13,19 t aufweist. Die Spannungsverteilungen in den Schnitten G_a und F_a sind wieder aus denen der Schnitte F und G gefolgert worden.

Bei den Normalspannungen in den Diagonalschnitten Fig. 32 soll besonders auf die günstigere Spannungsverteilung in den Schnitten senkrecht zur Achse der Druckdiagonale gegenüber denen senkrecht zur Zugdiagonale in den durch

sie verdeckten Knotenblechpartien hingewiesen werden. Während bei jenen nur Druckspannungen auftreten, kommen bei diesen in den meisten Schnitten Zug- und Druckspannungen vor. Die Normalspannungen der Schnitte R und S sind besonders herausgezeichnet.

Die Verteilung der Schubspannungen, Fig. 33, ist in den wagerechten und senkrechten Schnitten bei beiden Knotenblechhälften ähnlich derjenigen im Belastungsfall 1, nur daß hier kein Zeichenwechsel vom einen zum anderen Teil entsteht, indem die große Pfostenkraft wegfällt. Wieder ist der Verlauf der Schubspannung im Schnitt F einer Parabel ähnlich.

Bedeutende Schubspannungen treten in den Diagonalschnitten zwischen Lasche und Druckdiagonale auf, weil diese hier dem gezogenen Untergurtstab entgegenarbeitet. Die Schubspannungen im Schnitt S sind noch besonders herausgezeichnet worden.

b) Stabkräfte und Momente.

In Fig. 34 sind die Spannungsverhältnisse in den Füllungsgliedern dargestellt.

Beim Pfosten zeigt sich die Wirkung des Einspannmomentes durch eine fast geradlinige Spannungsverteilung. Alle vier Winkel arbeiten gut zusammen, da die Spannungslinie der hinteren Profile fast mit derjenigen der vorderen zusammenfällt. Das Moment wird infolge der großen Steifigkeit des Knotenbleches gegenüber dem Pfosten rasch abgebaut. Die im Außenschnitt gemessenen Spannungen von 394 bezw. 344 kg/cm² fallen im folgenden Schnitt auf 118 bezw. 120 kg/cm². Der Momentennullpunkt wurde aus den Verdrehungen des Pfostens bestimmt, siehe Tafel 14. Leider ist er, wie spätere Untersuchungen zeigten, etwas zu hoch angenommen worden, so daß die Querkraft von 0,524 t zu klein ist. Der bereits früher bekanntgegebenen Auffassung gemäß wurde der Momentenverlauf in den Füllungsstäben nach dem kontinuierlichen Balken mit elastisch senkbaren und drehbaren Stützen behandelt, wobei gewisse Momente und Querkräfte durch Messungen bestimmt werden können. Jedes Nietpaar wird als elastisch senkbare und drehbare Stütze aufgefaßt. Daß es Momente aufnimmt, geht am deutlichsten aus dem Vergleich der gemessenen Pfostenmomente hervor, wo der rasche Abbau fast nicht anders zu erklären ist. Wieviel ein Nietpaar jeweils vom Balkenmoment aufnimmt, müßte durch besondere Versuche festgestellt werden; in unserem Falle haben wir uns mit Annahmen begnügt. Es spielt hierbei außer Lage und Größe der Niete auch die Dicke der angeschlossenen Schenkel und in gewissen Fällen die Reibung zwischen den aneinandergenieteten Teilen eine Rolle. Ebenso ist in Betracht zu ziehen, daß infolge Montagefehlern nicht alle Niete in jeder Richtung gleich elastisch arbeiten.

Bei den Diagonalen treffen wir die gleichen Spannungs- und Abbauverhältnisse an, wie sie bereits am Belastungsfall 1 erläutert wurden. Wieder zeigt sich die gleiche Wirkungsweise des letzten einzeln stehenden Anschlußnietes.

Die Zahlentafel 7 soll die Wirkungsweise der Anschlüsse der Füllungsglieder in beiden Belastungsfällen veranschaulichen (s. Fig. 26 und Fig. 34).

Aus diesen Zahlen geht hervor, daß sich zwischen Diagonalen und Pfosten ein großer Unterschied im Kraftabbau geltend macht. Während dieser bei den Diagonalen annähernd gleichmäßig vor sich geht, zeigt sich bei den Pfosten zwischen dem ersten und zweiten Schnitt ein Unterschied, der ein Mehrfaches der anderen Abwanderungsbeträge ist. Zum Vergleich wurde der Pfosten 4 A' herbei-

Zahlentafel 7. Kraftabbau an den Füllungsgliedern.

Schnitt	Belastungsfall 1				Belastungsfall 2				Bel.-Fall 1	
	Pfosten		Diagonale		Pfosten		Diagonale		Pfosten 4 A'	
	Kraft t	Unterschied	Kraft t	Unterschied	Kraft t	Unterschied	Kraft t	Unterschied	Kraft t	Unterschied
1	−41,54	**16,30**	+28,86	7,72	+17,75	6,35	−15,39	4,78	−42,14	**18,30**
2	−25,24	7,97	+21,14	6,62	+11,40	2,47	−10,61	3,05	−23,84	6,21
3	−17,27	7,18	+14,52	7,90	+ 8,93	4,87	− 7,56	4,29	−17,63	7,74
4	−10,09	3,61	+ 6,62	6,62	+ 4,06	4,06	− 3,27	3,27	− 9,89	4,62
5	− 6,48	6,48							− 5,27	5,27

gezogen, der ganz ähnliche Verhältnisse zeigt. Wie weit hier die Wirkung der Niete durch Kraftaufnahme und Verformung, die Reibungskräfte und die Unterfutterung eine Rolle spielen, müßte durch besondere Versuche festgestellt werden. Lehrreich ist, daß das letzte einzelstehende Anschlußniet bei den Diagonalen fast so viel Kraft aufnimmt wie die vorhergehenden Nietpaare.

Zur Darstellung des Wanderns der Kraftachsen soll die folgende Zusammenstellung dienen (s. Fig. 26). Hierbei wurde aus den auf der Außenseite der Füllungsglieder gemessenen Spannungen die Lage der resultierenden Kraft bestimmt, und zwar beim Pfosten einerseits für die zwei vorderen bezw. hinteren Winkel bezüglich des Knotenbleches und anderseits für die zwei Winkel rechts bezw. links der Stabachse. Bei der Dingonale handelt es sich um die Lage der resultierenden Kraft im vorderen bezw. hinteren [-Eisen.

Zahlentafel 8. Wandern der Kraftschwerpunkte im Belastungsfall 1.

Schnitt	Pfosten				Diagonale	
	Projektion auf die abstehenden Schenkel		Projektion auf das Knotenblech		Projektion auf die Flanschen	
	η_{vorn} cm	η_{hinten} cm	η_{links} cm	η_{rechts} cm	η_{vorn} cm	η_{hinten} cm
r_1	**2,30**	**2,30**	**2,30**	**2,30**	**1,82**	**1,87**
1	2,01	2,07	2,45	2,50	1,59	1,62
2	2,79	2,78	1,91	1,97	1,87	1,79
3	2,29	2,63	2,24	2,28	1,56	1,59
4	2,34	2,36	2,45	2,18	1,24	1,13
5	1,47	1,17	3,93	3,47		
Schlußniet	0,40	0,40	4,00	4,00	0,35	0,35

Aus diesen Angaben geht hervor, wie die Kraft vom Schlußniet aus ansteigend sich mit verschiedenen Schwankungen infolge neuer hinzutretender Anschlußkräfte dem räumlichen Schwerpunkt der Profile nähert. Infolge der Unkenntnis der Spannungen auf der Innenseite dieser Profile würden die einzelnen Ordinaten in Wirklichkeit noch Aenderungen erfahren. Die Meßergebnisse im Belastungsfall 2 sind ähnlich.

Die Fig. 35 zeigt das Arbeiten der Gurtungen. Im Schnitt A wurden 34,13 t und im Schnitt M 12,37 t ermittelt. Der Abgang der Kräfte aus den Gurtwinkeln und der Lamelle auf das Knotenblech kann durch die vielen Meßergebnisse leicht verfolgt werden. Von besonderer Eigenart ist das Spannungsbild des Schnittes A, wo die zwei Laschen 170×8 ein Zusatzmoment aufnehmen.

c) Statische Untersuchungen.

Auch hier wurden die Gleichgewichtsuntersuchungen an einzelnen Elementen, Knotenblechausschnitten und Diagonalanschlüssen wie im Belastungsfall 1, Fig. 27

und 29, durchgeführt und ähnliche Uebereinstimmungen gefunden. Sie sind daher hier weggelassen worden.

Zur Untersuchung der statischen Verhältnisse dienen die Fig. 36, 37 und 38 der Tafel 8 und die zugehörige Zahlentafel. Zur Vereinfachung wurde für die Berechnung der Schwerpunktsmomente wieder eine ideelle Schwerlinie angenommen und die Anschlußnietkräfte der Diagonalen, auf deren Achse zusammengefaßt, eingeführt. Da keine Korrekturen an den gemessenen Kräften und Momenten vorgenommen wurden, so zeigen sich die Fehler auch in der Kurve der Schwerpunktsmomente und Querkräfte. Die Zahlentafel über Gleichgewichtsuntersuchungen an gemessenen Stabkräften und Momenten gibt ein Bild über die Genauigkeit der einzelnen Werte. Die sich ergebenden Unterschiede sind einerseits begründet in der Verschiedenheit der Spannungen an der Außen- und Innenseite der Profile infolge Nietverformung und in den angenommenen Ergänzungen der Spannungskurven. Diese Ergänzungen wurden immer dem allgemeinen Spannungsbild untergeordnet, wie aus den vielen gezeichneten Kurven ersichtlich ist. Die zu 1,30 t und 0,15 t veranschlagten Querkräfte in den Schnitten *A* und *M* betragen, nach Mohr berechnet, 1,15 t und 0,14 t und unter Berücksichtigung elastischer Knotenbleche 1,55 t und 0,51 t, wobei auch diese Werte als Näherungswerte zu bezeichnen sind. Beim Knotenblech 4 *A'* wurden zur besseren Feststellung dieser Querkräfte noch die Momente in Stabmitte bestimmt, siehe Fig. 42, Tafel 9. Besondere Schwierigkeiten machen die Ergänzungen der Schubspannungen in den Schnitten *F* und *G* am Knotenblech und in den Gurtwinkeln. Es muß späteren Arbeiten überlassen werden, die Untersuchungen der Schubspannungen nahe an Nietlöchern durchzuführen und die Nebenbeanspruchungen einzelner Konstruktionselemente zu ergründen. Daß auch in den Gurtwinkeln Schubkräfte wirken, geht schon aus den verschiedenen Spannungen an den Randstellen eines Schnittes hervor.

Die aus den äußeren Kräften berechneten und gemessenen Schwerpunktsmomente in den Schnitten F, G, F_a, G_a weisen ziemliche Unterschiede auf, die aus der Summierung der verschiedenen Fehlereinflüsse zu erklären sind. Sie sind bei keiner anderen Knotenblechuntersuchung so groß. Auch hier ist aus der Schwerpunktmomentenfläche ersichtlich, in welchem Maße Zusatzbeanspruchungen in den Knotenpunkten auftreten, die deren Verformung verursachen. Während die Druckdiagonale eine bedeutende Vergrößerung des Biegungsmomentes bis zu 3,60 mt bewirkt, sinkt dieses durch die Zugdiagonale fast auf null. Diese Umstände kommen bei der theoretischen Erfassung der Einspannmomente zur Geltung, und es soll darauf verwiesen werden (s. Kap. VI, Abschnitt 3).

C. Versuche am Knotenblech 4 A'. (Tafel 9.)

1. Belastungsfall 1.

a) Das Knotenblech 4 *A'*, Fig. 39, unterscheidet sich vom Knotenblech 4 *A* durch seine größere Länge von $2 \times 80 = 160$ mm, bedingt durch die Anschlußwinkel an den Diagonalen. Der folgende Versuch hat den Zweck, zu untersuchen, welchen Einfluß diese Anschlußwinkel auf das Knotenblech ausüben und wie sich die Spannungsverteilung infolge der Formänderung gestaltet. Als Anschlußwinkel werden 2 Winkel $60 \times 60 \times 6$ verwendet, deren Schenkel durch je zwei 16 mm-Niete an den Diagonalflanschen und am Knotenblech befestigt wurden. Ihre Lage war bedingt durch die Anschlußniete der Diagonalen und durch die für die Messungen frei zu lassenden Knotenblechflächen.

Die Untersuchungen wurden im gleichen Maße wie beim Knotenpunkt 4 *A* durchgeführt, es sollen jedoch der Abkürzung wegen nur die wichtigsten Ergebnisse erwähnt werden. Beim Vergleich der Fig. 39 und Fig. 24 zeigt sich, daß die Druckzone am Knotenblech 4 *A'* über der Anschlußlasche des Untergurtstabes bedeutend größer ist. In der Zone zwischen Lasche und Pfosten sind die gleichen Spannungsflächen um die 80 mm Verlängerung vorgerückt; gegen den Pfosten zu findet jedoch ein Ausgleich statt, wie aus dem besonders herausgezeichneten Normalspannungsverlauf im Schnitt *F* Fig. 40 zu ersehen ist. Hier sind die Spannungskurven von Knotenblech 4 *A* und 4 *A'* übereinandergezeichnet und bei Betrachtung der beiden Mittellinien werden keine großen Abweichungen sichtbar. Bei dieser Gelegenheit soll auf die große seitliche Ausbiegung im Knotenblech 4 *A'* nahe am Gurtwinkel hingewiesen werden. Eine Einwirkung infolge der Anschlußwinkel wird im Schnitt *F* nicht bemerkt. Ebenso weisen auch die Knotenblechpartien am oberen Rand keine Veränderungen im Spannungsverlauf auf. Hingegen verteilen sich die Normalspannungen der wagerechten Schnitte unterhalb der Diagonale auf eine bedeutend längere Strecke, wobei die Höchstbeanspruchung mit 240 kg/cm² gegen 260 kg/cm² bei 4 *A* fast die gleiche bleibt. Hierdurch kann auf eine verbreiterte Wirkung des Diagonalanschlusses geschlossen werden.

Auch bei den Diagonalschnitten weisen gewisse Spannungserhöhungen hinter den Anschlußwinkeln auf ein Arbeiten dieser Winkel hin. So hat das gleiche Feld an der tiefer liegenden Abschrägung des unteren Winkels eine Normalspannung in Richtung der Diagonalachse von 435 und 497 kg/cm² gegenüber 422 und 383 kg/cm² bei 4 *A*. Das gleiche ist der Fall hinter der Abschrägung des oberen Anschlußwinkels, wo Normalspannungen von 662 und 655 kg/cm² gegen etwa 600 kg/cm² vorkommen. Da hier nicht die gleichen Felder vermessen werden konnten, ist dieser Wert aus den benachbarten Spannungswerten ermittelt worden. Infolge des Arbeitens der Anschlußwinkel findet auch eine Abminderung der Höchstspannungen im Bereich des letzten Anschlußnietes der Diagonale statt. Um dort die verteilende Wirkung zu zeigen, wurde in Fig. 25 am Schnitt *R* auch der Spannungsverlauf von 4 *A'* eingetragen. Statt der Spannungen 830 und 926 kg/cm² kommen am gleichen Punkt bei 4 *A* nur noch solche von 819 und 828 kg/cm² vor. Diese Veränderungen zeigen an, daß unzweifelhaft auch in dem durch das Knotenblech verdeckten Teil günstigere Spannungsverteilungen infolge der Anschlußwinkel vorkommen. Im ungünstigsten Schnitt F_a wird jedoch keine Verbesserung im Spannungsverlauf gegenüber dem Knotenblech 4 *A* eingetreten sein, da bereits der Schnitt *F* keine Veränderung mehr aufweist.

b) Stabkräfte und Momente.

In den Außenschnitten wurden im Vergleich zum Knotenpunkt 4 *A* die in der Zahlentafel 9 aufgeführten Kräfte und Momente gemessen.

Auf Grund dieser Ergebnisse kann gesagt werden, daß es kaum möglich ist, den Einfluß des größeren Knotenbleches auf die Stabkräfte und Momente festzustellen, da er innerhalb der Fehlergrenzen liegt. Hingegen kann aus den Querkräften am Untergurt auf eine größere Versteifung desselben infolge des längeren Knotenbleches geschlossen werden.

Die Spannungsverhältnisse und der Kraftabbau durch die Anschlußniete weichen wenig von den früheren Angaben ab.

In Fig. 41 sind die Anschlußwinkel in Verbindung mit der Diagonale dargestellt. Die Anschlußwinkel weisen Beanspruchungen bis zu 180 kg/cm² auf.

Zahlentafel 9.

Allgemeines		Knotenpunkt 4 A'			Knotenpunkt 4 A		
Stab	Schnitt	Stabkraft t	Moment cmt	Querkr. t	Stabkr. t	Moment cmt	Querkr. t
Diagonale 4—1	—	+ 26,73	+ 13,50	—	+ 28,86	+ 13,18	0,915
» 4—5	—	+ 28,97	— 16,80	0,92	+ 28,96	— 17,40	—
Pfosten	—	— 42,14	—	—	— 41,54	— 1,09	—
Gurtstab 4—2	A	+ 23,95	— 98,79 [1]	—	+ 24,93	—106,5	1,02
» 4—2	F	—	—	—	+ 44,64	—	—
» 4—6	M	+ 23,40	+109,50 [1]	1,70 [2]	—	—	—
» 4—6	Mitte Stab	+ 25,81	+ 69,90	1,70 [2]	—	—	—

Bei gleicher Spannung an Außen- und Innenseite wurde ermittelt bei den
oberen Winkeln im Schnitt I: 1,21 t, im Schnitt II: 2,08 t,
unteren » » » I: 0,98 t, » » II: 1.99 t.

Die Beanspruchung der Anschlußwinkel wird hervorgerufen einmal durch die Uebertragung von Kräften aus den Diagonalflanschen auf das Knotenblech und ferner infolge der örtlichen Verstärkung des Knotenbleches und der Diagonalflansche durch die einzelnen Winkelschenkel. Es ist daher schwierig, durch einzelne Messungen zu bestimmen, wie groß die übertragenen Kräfte sind, wobei noch die Ungleichheit der Spannungen an den Außen- und Innenseiten infolge der elastischen Nietverformung ein weiteres Hindernis ist. Im weiteren wurde versucht, den Abgang der Kräfte an der Diagonale durch Vergleich dar Spannungsverteilung mit und ohne Anschlußwinkel selbst festzustellen, Fig. 41 und Fig. 26. Bei 4 A' sind die Spannungen in den Flanschen der Schnitte I und II größer und im Steg kleiner als bei 4 A, bestimmte Schlüsse lassen sich jedoch hieraus nicht ziehen. Als einziger sicheres Beweis für das Arbeiten der Anschlußwinkel können nur die Spannungsänderungen im Knotenblech angesehen werden.

c) Statische Untersuchungen.

Es kommen keine neuen Gesichtspunkte in Betracht.

2. Belastungsfall 2.

a) Das Knotenblech. Fig. 42.

Der Spannungszustand hat gegenüber dem von Knotenblech 4 A keine großen Aenderungen erfahren. Ueber der Anschlußlasche in A ist die Zugzone, über der bei M die Druckzone, größer geworden. In den Schnitten G und F ist der Spannungsverlauf fast der gleiche geblieben, was schon bei Belastungsfall 1 festgestellt worden ist. Sehr schön zeigt sich die Wirkung der Druckdiagonale, indem die vom Schnitt A herkommenden großen Zugspannungen absorbiert werden, so daß in F nur noch ein Rest übrig bleibt. In den wagerechten Schnitten unter der Druckdiagonale sind keine besonderen Veränderungen infolge der Anschlußwinkel wahrnehmbar, die Druckkurven scheinen sich infolge der Verlängerung des Knotenbleches einfach fortzusetzen. Auf der Seite der Zugdiagonale machen sich hingegen die gleichen, bei Belastungsfall 1 bereits angegebenen Merkmale für ein Arbeiten der Anschlußwinkel bemerkbar. Für den Diagonalschnitt R wurde in Fig. 32 der Spannungs-

[1]) Schnitt im Vergleich zu 4 A um 80 mm verschoben.
[2]) Aus den gemessenen Momenten festgestellt. Die Momente sind Zentriermomente M_z.

verlauf für Knotenblech 4 *A* und 4 *A'* eingezeichnet, wobei sich jedoch beim Vergleich der Mittellinien kein großer Unterschied in der Spannungsverteilung zeigt. Im unteren Teil von *B* stimmen die Kurven beider Bleche fast miteinander überein.

b) Stabkräfte und Momente.

Es wurden folgende Stabkräfte und Momente in den Außenschnitten gemessen.

Zahlentafel 10.

Allgemeines		Knotenpunkt 4 *A'*			Knotenpunkt 4 *A*		
Stab	Schnitt	Stabkr. t	Mom. cmt	Querkr. t	Stabkr. t	Mom. cmt	Querkr. t
Diagonale 4—1	—	— 13,64	— 24,75	0,15	— 15,40	— 24,00	0,15
» 4—5	—	+ 16,77	— 23,90	0,36	+ 17,75	— 21,40	0,35
Pfosten	—	— 0,30	— 30,72	1,00	— 0,23	— 31,40	0,52
Gurtstab 4—2	*A*	+ 32,56	+ 40,80 [1]	1,51	+ 34,13	+ 42,50	1,30
» 4—2	Stabmitte	+ 34,48	+ 4,50	1,51	—	—	—
» 4—6	*M*	+ 12,00	+ 17,15 [1]	0,23	+ 12,37	+ 19,33	0,15
» 4—6	Stabmitte	+ 12,57	+ 11,19	0,23	—	—	—

Aus dieser Zusammenstellung der gemessenen Werte an den Knotenpunkten 4 *A* und 4 *A'* kann auf eine Einwirkung größerer Knotenbleche auf die Stabkräfte geschlossen werden. Sämtliche Stabkräfte sich entsprechender Schnitte außer der Pfostenkraft sind bei Träger *A'* kleiner Ganz ähnliche Verhältnisse weist die Zahlentafel zu Belastungsfall 1 auf. Beim Vergleich der Gurtstabkräfte, im Stoß und in der Stabmitte zeigt sich, daß diese immer größer sind, weil bei den Laschen an deren Innenseite größere Spannungen vorkommen, die durch die Messungen nicht erfaßt werden können. In der Fig. 42 sind die Spannungsverteilungen im Schnitt *A* und im Schnitt Mitte Stab U_{2-4} einander gegenüber gestellt, woraus sofort aus der vielgestaltigen Spannungsfläche des Schnittes *A* gegenüber der des Schnittes *U* ersichtlich ist, wie verwickelte Kräftewanderungen in einem Stoß stattfinden. Auch hier tritt wieder wie in Fig. 35 die Nebenbeanspruchung der Laschen 170 × 8 deutlich hervor.

Diese Nebenbeanspruchungen einzelner Konstruktionsteile treten bei näherer Betrachtung der Spannungslinien überall zutage. Fast nirgends stimmen die Spannungen an der Gurtlamelle mit denen der an ihr angeschlossenen Winkelschenkel überein, Fig. 26, 35 usw. Die Gurtwinkel erfahren Zusatzbeanspruchungen aus sekundären Biegungsmomenten, die in der Trägerebene und in der Lamellenebene wirken. Sie können schon durch ungleichmäßiges Arbeiten der Niete hervorgerufen werden. Ueberall macht sich die Verformung der Niete geltend.

Die Spannungsverteilung in den Außenschnitten und der Kraftabbau durch die Anschlußniete in den Füllungsgliedern ist ähnlich den bereits bei 4 *A* erwähnten Zuständen. Die Anschlußwinkel wurden einer noch eingehenderen Untersuchung unterzogen, indem in je fünf Schnitten die Spannungen gemessen wurden. Die Winkel an der Druckdiagonale haben bis zu 109 kg/cm² Druck, an einzelnen Stellen tritt auch Zug auf. Bestimmte kennzeichnende Kurven, aus denen ein einwandfreier Uebergang von Kräften von den Diagonalflanschen

---

[1]) Schnitt im Vergleich zu 4 *A* um 80 mm verschoben. Die Momente sind Zentriermomente M_z

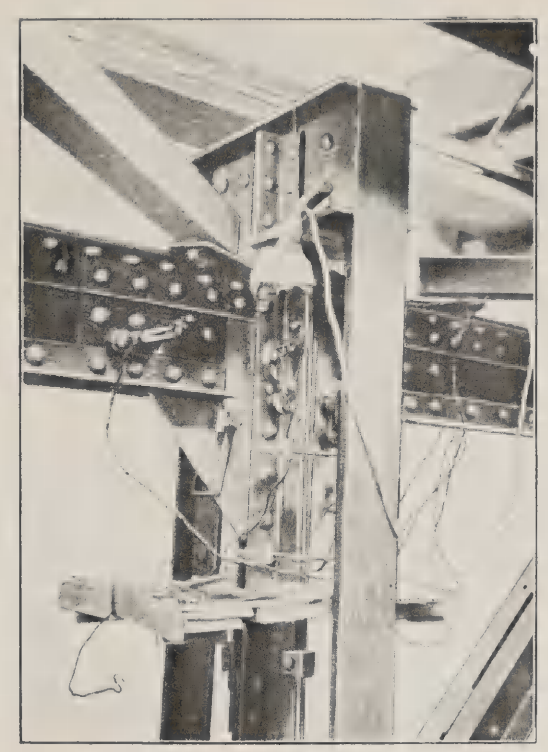


Abb. 20.
Knotenpunkt 3 A' mit Druckrahmen über dem Fixpunkt.

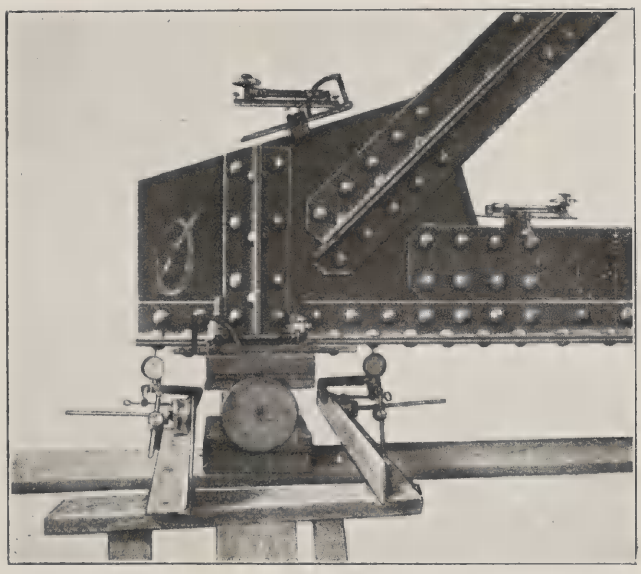
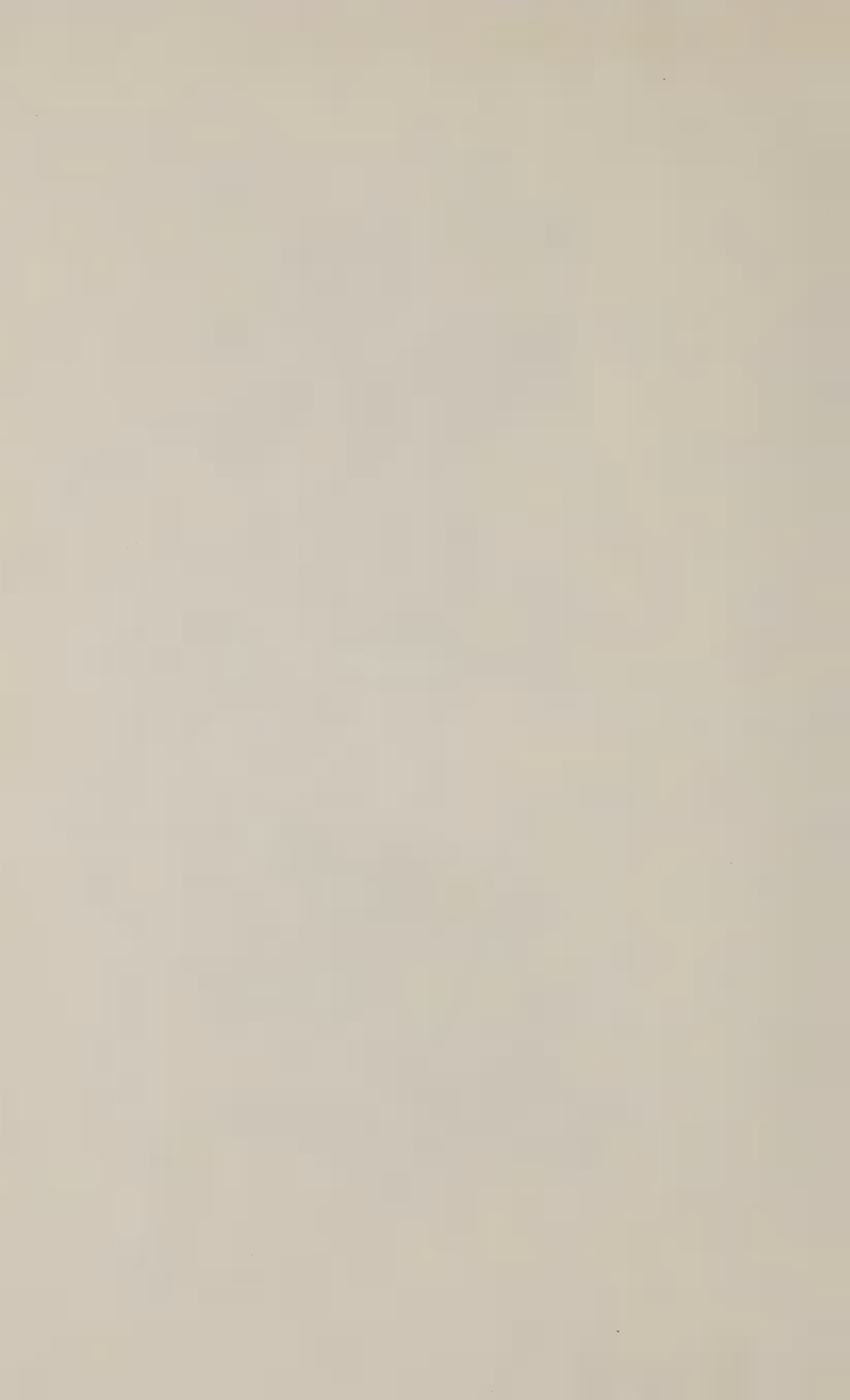


Abb. 21.
Bewegliches Auflager mit Drehwinkel- und Senkungsmessern.



auf das Knotenblech geschlossen werden konnte, ergaben sich nicht. Die meisten Kurven sind gleichförmig wie die in Fig. 41 dargestellten.

c) Statische Untersuchungen.

Sie sind, wie beim Knotenpunkt 4 *A* durchgeführt worden und bieten nichts Neues.

D) Versuche an den Knotenpunkten 3 A und 3 A'. (Tafeln 10 bis 12.)

1. Belastungsfall 1.

a) Allgemeines.

Die Knotenbleche 3*A* und 3*A'* sind in den Fig. 43, 44 und Abb. 19, Textblatt 2, Seite 40, und 20, Textblatt 3, dargestellt. Das eine ist um 90 mm länger als das andere, die Breite ist bei beiden gleich. Der Mittelpfosten ist dadurch bei 3*A'* mit 6 Nietpaaren, bei 3*A* mit 5 Nietpaaren an den Blechen angeschlossen. Die Anschlußlaschen der gestoßenen Obergurtstehbleche sind gleich ausgebildet wie am Untergurt, nur daß die Saumwinkel noch hinzukommen. Bei dieser Gelegenheit soll auf das Wandern der Schwerlinie in der Gurtung eingetreten werden, s. auch Fig. 18. Beim Entwurf des Probeträgers wurde als Zentrierlinie die ideelle Schwerlinie des Obergurtstabes ohne Saumwinkel und ohne deren Unterfutterung eingeführt. Da sich bei den Messungen zeigte, daß die Saumwinkel auch mitarbeiten (siehe Fig. 45, Mittelschnitt), so wurde bei der Berechnung der Nebenspannungen die ideelle Schwerlinie von 60 mm auf 96 mm verschoben. Hierdurch entstanden in den Endpunkten 1 und 5 Exzentrizitäten von 36 mm. Es zeigt sich nun, daß in den Mittelpartien der Obergurtstäbe auch die Futter mitarbeiten, wodurch die Schwerlinie hier noch tiefer zu liegen kommt. Gegen die Anschlußlaschen zu kommt dann die 96 mm-Linie zur Geltung. Von den ersten Anschlußnieten an verschieben sich die Schwerpunkte wieder nach unten, wobei im Schnitt durch die Stoßfuge beim Knotenpunkt 3*A* außer den Laschen noch die ganzen Saumwinkel zur Wirkung kommen, während dies bei 1 und 5 *A* nicht mehr der Fall ist. Weitere Veränderungen in der Schwerlinie finden wieder statt durch das Eingreifen des Knotenbleches. Außer allen diesen Aenderungen in der Wirkung der Konstruktionsteile kommen noch die Schwankungen infolge der verschiedenen Nietlöcher hinzu, welche bei gedrückten Stäben jedoch, je nachdem die Nietschäfte die Löcher ausfüllen und je nachdem die Niete zur Wirkung kommen, verschwinden können. Die geschilderten Verhältnisse kommen bei großen Bauwerken auch vor, nur nicht in solchen Gegensätzen wie in unserem Falle, wo die Wahl einer richtigen Zentrierlinie, die sich der Schwerlinie möglichst anpaßt, sehr schwierig ist.

Die Messungen wurden wie bei den früheren Versuchen auf beiden Seiten ausgeführt. Da die Last von 50 t, die durch eine 24 cm lange Auflageplatte verteilt wird, unmittelbar über den Knotenpunkten wirkt, so treten große Biegungserscheinungen im Obergurt und im Knotenblech auf. Schwierig ist hierbei die Bestimmung der unmittelbaren Lastübertragung durch die einzelnen Konstruktionselemente. Es nehmen außer dem an der Oberkante gehobelten Knotenblech der Pfosten und die Gurtwinkel mit der Lamelle an der Lastübertragung teil. Anhaltspunkte hierüber ergeben sich durch die gemessenen Schubkräfte im Knotenblech, durch die Spannungsverteilung im Pfosten und aus den Nebenbeanspruchungen der Gurtwinkel und Lamelle. Erschwert werden diese Bestimmungen durch den Umstand, daß der Knotenpunkt 3 Fixpunkt des ganzen Trägersystems ist, wodurch noch Neben-

erscheinungen auftreten. Die oberen Gurtglieder erhalten durch das Angreifen der Verbandstäbe seitliche Biegung, wie aus Fig. 45 deutlich ersichtlich ist.

Der oberste Schnitt durch den Pfosten in der gleichen Figur weist eine Druckkraft von 15,0 t auf, und die Spannungskurven zeigen, daß ein großer Teil der Außenlast unmittelbar durch die anliegenden Winkelschenkel aufgenommen worden ist. Um wenigstens einigermaßen die Meßergebnisse verfolgen zu können, wurden bei Knotenpunkt $3A'$ folgende Annahmen gemacht:

Unmittelbare Pfostenbelastung	15,0 t
unmittelbare Knotenblechbelastung . . .	15,4 t = 0,642 t/cm
Belastung der oberen Gurtglieder . . .	19,6 t = 0,817 t/cm
Gesamte Druckkraft	50,0 t

Hierbei ist klar, daß in Wirklichkeit keine gleichmäßige Lastverteilung vorkommt. Es soll nun versucht werden, das Arbeiten der einzelnen Konstruktionsglieder am Knotenpunkt $3A'$ zu erforschen.

Der ganze Obergurt ist als kontinuierlicher Balken auf elastisch senkbaren und drehbaren Stützen aufzufassen. Infolge der symmetrischen Belastung kommen am Mittelpfosten keine Biegungsmomente vor. Aus den gemessenen Momenten in Mitte Stab $O_{3\text{-}5}$ und am Stoß des Knotenpunktes $3A'$ ergibt sich eine Querkraft von 3,0 t, siehe Fig. 45. Diese Querkraft muß am Stoß von den Laschen, den Saumwinkeln und den durchgehenden Gurtwinkeln aufgenommen werden. Daß jedes Konstruktionsglied im Schnitt durch den Stoß an der Querkraftaufnahme beteiligt ist, geht aus der Nebenbeanspruchung aller Teile hervor. Den Gurtwinkeln wurde entsprechend ihrer Steifigkeit eine Querkraft von 0,5 t zugewiesen. Da die übrigen Teile am Knotenblech endigen, so hat dieses den Rest von 2,5 t aufzunehmen. Die Wirkung dieser Querkraft wird aus den Messungen am Knotenblech unterhalb der Anschlußlaschen ersichtlich, wo in den senkrechten Schnitten gleichgerichtete Scherspannungen auftreten, vergl. Fig. 47 von $3A$, die ähnlich ist für $3A'$. Diese Scherspannungen nehmen gegen den Pfosten zu ab, und im Schnitt g sind sie bereits entgegengesetzt, d. h. negativ gerichtet. Nur in dem durch die Gurtwinkel verdeckten Teil kommen noch positive Scherspannungen vor, wie aus den Kurven bei Knotenblech $3A$, Fig. 48, Schnitt g hervorgeht, wo sie noch in den Meßbereich hineinkommen. Diese Verminderung der Querkraft am Knotenblech beweist, daß die Gurtwinkel durch die 50 t Last unmittelbar belastet werden und so in der Lage sind, die aus dem Knotenblech durch die Halsniete abwandernden Vertikalkräfte aufzunehmen. Sie können als kontinuierliche Balken auf elastisch senkbaren Stützen, die durch die Halsnieten geschaffen werden, angesehen werden. Gemessen wurde am Knotenblech $3A'$ Fig. 48 im Schnitt g eine nach oben gerichtete positive Querkraft von 0,97 t und im Schnitt f eine negative Querkraft von 5,18 t. Damit diese Messungen erfüllt werden, muß die Summe der senkrechten Kräfte der zwei ersten Niete — 1,53 t und die senkrechte Komponente der dritten Nietkraft — 4,55 t betragen. Es ergibt sich die nachfolgende Zusammenstellung über die Kräftewirkung am Knotenblech:

Querkraft aus Laschenteilen und Saumwinkel . . .	+ 2,50 t
Senkrechte Halsnietkräfte infolge Gurtwinkelbelastung + 1,00,	— 2,53 t
Querkraft im Schnitt g	+ 0,97 t
Senkrechte Halsnietkraft infolge Gurtwinkelbelastung	— 4,55 t
Unmittelbare Knotenblechbelastung = 2,5 × 0,642 =	— 1,60 t
Querkraft im Schnitt f	— 5,18 t
Senkrechte Kraft des mittleren Nietes	— 3,22 t

Die Summe aller senkrechten Halsnietkräfte, einschließlich der in beiden Stößen durch die Gurtwinkel aufgenommenen Querkräfte, muß gleich der unmittelbaren Belastung der oberen Gurtglieder von 19,6 t sein. Im Schnitt *g* Fig. 45 weisen diese in den äußeren Fasern Spannungsunterschiede bis zu 500 kg/cm² auf, wobei allerdings ein Teil von der seitlichen Beanspruchung herrührt. Leider war ein genaues Messen auf der Seite, wo die Knotenbleche des Verbandes angreifen, nicht möglich. Das gerechnete Biegungsmoment an dieser Stelle unter Verwendung der ermittelten Nietkräfte als Belastung würde einen Spannungsunterschied von 460 kg/cm² ergeben. Die Fig. 45 zeigt deutlich, wie verschiedenartig das Arbeiten der einzelnen Konstruktionsteile unter einer unmittelbar wirkenden Lat ist, und wie viele rechnerisch nicht erfaßbare Umstände dabei zur Geltung kommen.

Die wagerechten Komponenten der Halsnietkräfte können aus dem Abbau der Kraft in den Laschen 70 × 8 und aus den Normalkräften der Schnitte *g* und *f* bestimmt werden.

Durch diese Angaben der allgemeinen Verhältnisse kann auf die Besprechung der einzelnen Teile des Knotenpunktes eingetreten werden.

b) Das Knotenblech.

In Fig. 43 ist der durch Messung bestimmte und mutmaßlich ergänzte Trajektorienverlauf im Knotenblech 3 *A* dargestellt. Infolge der Symmetrie wurde nur eine Hälfte gezeichnet. Es müssen hier Maximal- und Minimaltrajektorien eingeführt werden, da in vielen Teilen des Knotenbleches beide Hauptspannungen Druck aufweisen und so die Bezeichnung als Zug- und Druckhauptlinien nicht mehr allgemein gültig ist. Nach der Annahme einer unmittelbaren Belastung des Knotenbleches 3 *A* von 0,612 t/cm, d. h. 0,51 t/cm², ist die Beanspruchung in senkrechter Richtung geringer als in wagerechter Richtung, wo Druckspannungen von 0,9 t/cm² auftreten. Es gehen daher vom belasteten und unbelasteten oberen Knotenblechrand Maximaltrajektorien aus. In dem durch die Gurtwinkel verdeckten oberen Knotenblechteil verlaufen die Minimaltrajektorien von den Nietlöchern aus teils unmittelbar wagerecht gegen den Pfosten zu, teils werden sie nach unten abgelenkt. Desgleichen kommen von den Löchern der Pfostenanschlußnieten Minimallinien her, die nach aufwärts strömen und in die bereits erwähnten, von den Nieten der Gurtwinkel und Laschen ausgehenden Minimaltrajektorien übergehen. Da die unteren Teile der Anschlußlaschen Zug aufweisen und dies auch fast beim ganzen unteren Knotenblechrand der Fall ist, so müssen die Anschlußniete der Saumwinkel auf das Knotenblech Zugkräfte ausüben. Die Maximallinien werden hier zu Zugtrajektorien und umfassen die zwei genannten Nieten in üblicher Weise. Dadurch wäre die Ergänzung des Kraftfeldes vollständig, und sie fügt sich gut in das Bild der gemessenen Kurven ein. Es zeigen sich wieder verschiedene zusammenhängende Nietgruppen, so sind z. B. die zwei Anschlußniete der Saumwinkel am Stoß rechts mit den entsprechenden des linken Stoßes durch geschlossene Linienstränge verbunden. Es ist möglich, daß im einen oder anderen Teil des Knotenbleches Aenderungen infolge Abweichungen von den bisherigen Annahmen eintreten, an den Zusammenhängen im gesamten wird wohl nicht gerüttelt werden können.

Auf die Schubtrajektorien soll nur kurz hingewiesen werden, sie können aus den gezeichneten Hauptspannungslinien konstruiert werden.

Beim Knotenblech 3 *A'* zeigt sich ein ähnliches Kraftfeld.

In den Figuren 46, 47, 48 sind die Spannungsverhältnisse in verschiedenen Schnitten durch die Knotenbleche $3A$ und $3A'$ dargestellt, wobei die Spannungsflächen in den verdeckten Teilen ergänzt wurden. Lehrreich ist der Zusammenhang der Normalspannungskurven in den Schnitten g und f bei den zwei Knotenblechformen. Sie gehen am unteren Rand von $3A'$ in Druck über und können einfach als Fortsetzung der Kurven von $3A$ angesehen werden.

Die Ergänzung der Druckspannungsflächen in den wagerechten Schnitten Fig. 47 erfolgte durch die Bestimmung der Kräfte der Pfostenanschlußniete und der Querkräfte im Schnitt f vom Rand bis zu den betreffenden Schnittstellen.

c) Stabkräfte und Momente.

Es wurden folgende Stabkräfte und Momente an den Außenschnitten ermittelt:

Zahlentafel 11.

Allgemeines		Knotenpunkt $3A'$			Knotenpunkt $3A$		
Stab	Schnitt	Stabkraft t	Moment cm/t	Querkraft t	Stabkraft t	Moment cmt	Querkraft t
Gurtstab O_{3-5}	Mitte	— 48,20	+ 139,0	3,0			
O_{3-5}	i	— 46,17	+ 270,9	3,0	— 49,45	+ 269,6	3,0
O_{3-1}	i'	— 46,34	— 286,6		— 49,30	— 286,5	
Pfosten		— 42,18	—		— 39,64		

Die Momente sind Zentriermomente $\eta = 96$ mm.

Auch bei diesen Ergebnissen zeigt sich die Verminderung der Stabkräfte des Obergurtes und die Vergrößerung der Pfostenkraft als Folge größerer Knotenbleche. Ebenso ist die gemessene Kraft in Mitte Stab O_{3-5} größer als im Laschenschnitt. Merkwürdig ist die fast genaue Uebereinstimmung der Momente sich entsprechender Schnitte, was auch bei früheren Vergleichen festgestellt werden kann. Die Postenkraft von $3A'$ mit 42,18 t stimmt mit der von $4A'$, die 42,14 t aufweist, sehr gut überein; weniger gut ist die Uebereinstimmung beim Träger A mit 39,64 t und 41,54 t. Jener Wert wurde nachgeprüft, wobei jedoch keine große Abweichung gefunden wurde. Aller Wahrscheinlichkeit nach bewirkte die Nietverformung größere Spannungen auf der Innenseite, wo mit den Meßgeräten nicht zuzukommen war.

Der Pfostenanschluß an Knotenblech $3A'$ Fig. 45 zeigt von oben nach unten ein allmähliches Anwachsen der Druckspannungen. Einen verhältnismäßig starken Zuwachs erfährt der unterste Schnitt, was zeigt, daß nicht alle Reibungskräfte zwischen Pfosten und Knotenblech überwunden worden sind. Diese kommen nun da, wo das Knotenblech aufhört, zur Geltung. Sehr schön zeigt sich in der Seitenansicht das allmähliche Einlagern von Druckkräften in die abstehenden Schenkel. Es arbeiten daher trotz der Reibungskräfte die einzelnen Anschlußniete mit, nur nicht in dem Maße wie bei völlig überwundener Reibung. Der oberste Schnitt weist infolge der stark exzentrischen Beanspruchung durch die unmittelbare Belastung der anliegenden Winkelschenkel Zugspannungen an den Rändern der abstehenden Schenkel auf. Die Kraftzunahme in den verschiedenen Schnitten soll durch folgende Zahlentafel gezeigt werden, wobei als Vergleich der Anschluß von $3A$ beigefügt wird.

Die Zusammenstellung zeigt, daß die Kraftaufnahme bei weniger Nieten entsprechend größer ist. Die letzten Zahlen weisen auf die sehr große Kraft-

Zahlentafel 12. Kraftaufbau am Pfostenanschluß.

Knotenp.	Schnitt		1	2	3	4	5	6
3 A'	Gemessene Kraft	t	— 15,02	— 17,36	— 20,37	— 23,78	— 25,53	— 42,18
	Kraftaufnahme	t		2,34	3,01	3,41	1,75	**16,65**
3 A	Gemessene Kraft	t	— 15,25	— 20,05	— 25,42	— 27,73	— 39,64	
	Kraftaufnahme	t		4,80	5,37	2,31	**11,91**	

aufnahme zwischen dem 5. und 6. Schnitt hin, die zum Teil durch das Arbeiten der Anschlußniete und dann, wie schon erwähnt, durch die zur Geltung kommenden Reibungskräfte erklärt werden kann. Wie das oberste Nietpaar arbeitet, ist durch Messung nicht bestimmbar, da die Apparate nicht mehr an höheren Stellen angebracht werden konnten.

Bei den Gurtstäben wurden die Spannungsverhältnisse schon eingangs erwähnt.

d) Statische Untersuchungen. Tafel 12.

In Fig. 54 sind die Kraft- und Schwerlinie, die Schwerpunktmomente und die Querkräfte dargestellt. Um Gleichgewicht zu erhalten, werden einzelne gemessene Momente und Stabkräfte etwas abgeändert. Die gemessenen Schwerpunktmomente in den Schnitten f und g stimmen gut mit den aus den äußeren Kräften ermittelten überein. Das größte Schwerpunktmoment ist 6,30 mt. Die Aenderung des Schwerpunktes infolge des Nietabzuges in der Zugzone des Knotenbleches wurde in Schnitt e berücksichtigt.

Infolge der Verteilung der Auflagerkraft durch die Auflagerplatte findet eine Verminderung der Momente unterhalb der Platte statt, was im Verlauf der Kraftachse deutlich zum Ausdruck kommt.

Die zur Bestimmung der Nebenspannungen wichtigen Zentriermomente ergeben sich aus der Ordinate zwischen Kraftachse und Zentrierachse vervielfacht mit der wagerechten Komponente der Kraft selbst. Bei dieser einfachen Stabanordnung können die Zentriermomente bis nahe an den Schnittpunkt der Stabachsen durch Messungen festgestellt werden.

2. Belastungsfall 2. Tafel 11.

a) Allgemeines.

Bei diesem Belastungsfall verschwindet die störende Einwirkung der angreifenden Kraft. An Stelle der großen Pfostenkraft kommt ein Einspannmoment des Pfostens zur Geltung. Die Untersuchungen sollen am Knotenpunkt 3 A' durchgeführt werden, der Punkt 3 A wurde nicht eingehend vermessen und kann daher nicht zum Vergleich herangezogen werden.

b) Das Knotenblech.

Auf dieses wirken die vom Obergurt übertragenen Kräfte und das Einspannmoment des Pfostens. Der Trajektorienverlauf Fig. 49 zeigt daher im Oberteil des Knotenbleches wagerecht verlaufende Drucklinien, die die sich gegenüberliegenden Anschlußniete verbinden. Im Unterteil kommt der Einfluß des Pfostenmomentes dadurch zur Geltung, daß der rechte Knotenblechrand auf der ganzen Länge gedrückt wird, während der linke Rand zum größten Teil Zug aufweist. Es werden daher die Zughauptlinien, die den oberen Knotenblechteil lotrecht durchlaufen, seitlich nach dem gedrückten unteren Rande abgelenkt. Diejenigen auf der linken Seite verlaufen parallel dem gezogenen Rande und

umfassen den einen Pfostenanschlußniet. Die Druckhauptlinien im Unterteil verlaufen von den unteren Anschlußnieten des Gurtstabes O_{3-1} ausgehend in diagonaler Richtung auf den gezogenen Knotenblechrand zu.

Ist das Pfostenmoment nicht vorhanden, so weisen beide zur Pfostenachse geneigten Knotenblechränder Druck auf. In diesem Falle werden die den oberen Knotenblechteil lotrecht durchlaufenden Zugtrajektorien symmetrisch zur Mittelachse nach den beiden geneigten Rändern abgelenkt. Die ganze untere Knotenblechbegrenzung wird jedoch nicht immer überall Druck aufweisen. Je mehr sich der Winkel, den die geneigten Ränder mit der Pfostenachse einschließen, verkleinert, um so geringer werden in den senkrechten Schnitten des untersten Teiles die Druckspannungen, und es wird der Fall eintreten können, wo in diesen Teilen Zugspannungen auftreten, d. h. am Rand Nullpunkte entstehen.

Die Figuren 50, 52, 53 zeigen die Spannungsverteilung für verschiedene Schnitte durch das Knotenblech. Bei den senkrechten Schnitten nimmt die Druckspannung von oben nach unten allmählich ab, jedoch nicht geradlinig, wie aus der herausgezeichneten Kurve für Schnitt g Fig. 51 zu ersehen ist. Währenddem die Schnitte g' und f' über die ganze Länge Druck aufweisen, wechselt in den Schnitten g und f die Spannung im unteren Teil Den größten Druckspannungen entsprechend kommen auch im Bereich der Gurtstäbe die größten Schubspannungen vor, was aus Fig. 53 deutlich ersichtlich ist.

c) Stabkräfte und Momente

Die Fig. 51 zeigt die Spannungszustände der am Knotenblech 3 A' angeschlossenen Stäbe. Es wurden die in der folgenden Zahlentafel zusammengestellten Kräfte und Momente gemessen:

Zahlentafel 13.
Kräfte und Momente am Knotenpunkt $3A'$.

Stab	Schnitt	Stabkr. t	M_s cmt	Querkr. t
Gurtstab O_{3-5}	Mitte	— 25,99	+ 29,0	0,63
	i	— 23,72	+ 56,9	
	g	— 26,35	+ 78,3	1,22
Gurtstab O_{3-1}	g'	— 26,66	— 20,8	1,66
	i'	— 23,78	— 49,9	
Pfosten		— 0,20	— 25,8	1,00

Da der Abstand der Schnitte i-g und i'-g' klein ist, so ist es schwierig, die richtigen Querkräfte hieraus zu bestimmen, umsomehr, da diese selbst kaum eine Tonne betragen.

Bei den Gurtungen sind die Spannungslinien infolge der geringen Biegungsmomente ziemlich gleichmäßig. Die Saumwinkel arbeiten in der Stabmitte gut mit, weisen jedoch am Stoß nur noch geringe Spannungen auf im Vergleich zu den anderen Stabteilen. Die Laschen arbeiten gut, und der Kraftabbau daraus geht in normaler Weise vor sich. Seitliche Beanspruchungen durch den Versteifungsverband zeigen sich nur in unbedeutendem Maße.

Im Pfosten verteilen sich die Spannungen, wie schon früher festgestellt wurde, fast geradlinig. Der Abbau des Einspannmomentes kommt bei den verschiedenen Schnitten deutlich zum Ausdruck. Die statischen Verhältnisse und die Bestimmung der Anschlußnietkräfte sind in Fig. 55 und 56 dargestellt. Durch

die Messung der Momente in den Außenschnitten an 3 *A'* und 4 *A'* ist der ganze Momentenverlauf festgestellt. Hieraus ergeben sich Nullpunkt und Querkraft, welche 1,0 t beträgt. Infolge der Verdrehung des Pfostens durch die Einspannmomente nehmen auch die einzelnen Nietpaare an deren Uebertragung teil. Die durch sie übertragenen Momente wurden so geschätzt, daß die Fortsetzung der Momentenlinien in Fig. 55 durch die Endpunkte der in den betreffenden Schnitten gemessenen als Ordinaten dargestellten Momente gehen. Aus den Auflagerkräften und den durch die Nietpaare übertragenen Momenten lassen sich die Nietkräfte bestimmen.

Die durch die Einspannung sich ergebenden Beanspruchungen betragen am Außenschnitt + 359 kg/cm² und —322 kg/cm², und sie steigern sich noch gegen die ersten Anschlußniete zu. Sie sind beinahe fast so groß wie die Spannungen im Obergurtstab im gleichen Belastungsfall. Bei 3 *A* ergaben sich + 302 und — 355 kg/cm².

d) Statische Untersuchungen.

Um Gleichgewicht am Knotenpunkt 3 *A'* zu erhalten, wurden die äußeren Kräfte und Momente etwas abgeändert. In der Fig. 56 sind dargestellt die Kraft- und Schwerachse, die Schwerpunktmomente für senkrechte Schnitte und die Querkräfte. Die gemessenen und aus den äußeren Kräften gerechneten Schwerpunktmomente im Schnitt *g* und *g'* weisen keine großen Unterschiede auf. Als größtes Moment ergibt sich ein Wert von 2,42 mt. Infolge des Pfostenmomentes treten im Schnitt *e* und *e'* Absätze in der Kraftlinie und der Momentenlinie auf. In den gleichen Schnitten wurden wieder die schon in Belastungsfall 1 erwähnten Nietlochabzüge gemacht, wodurch sich die Momente infolge der Verschiebung der Schwerpunkte bedeutend verringern.

E. Versuche am Knotenblech 4 B. (Tafel 13.)

1. Belastungsfall 1.

a) Allgemeines.

Das Knotenblech 4 *B* ist ein Beispiel der Pfostenbauart. Der Teil rechts des Pfostens stimmt in Abmessung und Konstruktion völlig mit dem Knotenpunkt 4 *A* überein, der linke Teil jedoch ist kürzer und besitzt keine Diagonale. Die Stöße sind normal ausgebildet. Es wurde der Spannungszustand nur für einen Belastungsfall untersucht. Durch die allgemeinen Grundlagen und die vorgehenden Beispiele werden jedoch auch die Spannungsverhältnisse der anderen Belastungsfälle ermittelt werden können, besonders wird dies der Fall sein mit der Bestimmung des Verlaufes der Trajektorien.

b) Das Knotenblech.

Die vom Untergurtstab 2—4 kommende Kraft verteilt sich auf die Diagonale 4—5 und den Untergurtstab 4—6. In senkrechter Richtung wirkt die Druckkraft des Pfostens. Aus diesen Angaben kann der Verlauf der Kraftlinien bestimmt werden. Es zeigt die Fig. 57, wie die Anschlußniete der Diagonale mit denjenigen des Untergurtstabes 2—4 durch seilförmige Kraftlinienstränge zusammengehalten werden. Infolge der senkrechten Pfostenkraft hangen sie nach unten durch. Da der schräg zum Pfosten verlaufende Knotenblechrand gedrückt wird, so muß ein Teil der Zughauptlinien senkrecht auf diesen zulaufen. Der Trajektorienverlauf in dem durch die Gurtwinkel verdeckten Knotenblechteil konnte nicht völlig geklärt werden und wurde daher nur angedeutet. In jedem Fall wird bei dieser Belastung der größte Teil des Knotenbleches zur Ueber-

leitung der Zugkraft vom Gurtstab in die Diagonale und zum Abfangen der Pfostendruckkraft verwendet. Der Anschluß des Gurtstabes rechts nimmt nur einen kleinen Teil ein, indem die Hauptkraft für diesen Stab durch Gurtwinkel und Lamelle geht. Lehrreich ist, wie aus den Gurtwinkeln ein Teil der Kraft abwandert und durch das Knotenblech in die Laschen und das Gurtstehblech geleitet wird. Auch hier ist die Grenze der Trajektorien, die nach der Diagonale verlaufen, und derjenigen, die nach den Anschlußlaschen 4—6 abzweigen, gekennzeichnet.

Der Spannungsverlauf in verschiedenen Schnitten des Knotenbleches ist aus den Fig. 58 bis 63 ersichtlich, wo besonders auf das Heraufwandern der Zugspannungen aus dem Untergurtstab 2—4 in den senkrechten Schnitten des linken Teiles aufmerksam gemacht werden soll. Die Spannungsfläche vom Schnitt *G* ist in Fig. 58 vergrößert dargestellt. Auch hier zeigt sich keine geradlinige Spannungsverteilung. Im weiteren wurden für diesen Teil in Fig. 61 bis 63 Schub- und Normalspannungen eingezeichnet. In dem bereits erwähnten Schnitt *G* haben die Schubspannungen verschiedene Vorzeichen; die größten treten am oberen schrägen Knotenblechrand auf, und sie verringern sich nach abwärts. Mit der allgemein üblichen Berechnung der Scherspannungen lassen sich somit keine Näherungen erzielen. Durch den Trajektorienverlauf hingegen ist man in der Lage, die Verteilung der Schubspannungen einigermaßen abzulesen.

Die Spannungsverhältnisse im Knotenblech rechts vom Pfosten stimmen ziemlich überein mit denjenigen von Knotenblech 4 *A*, Belastungsfall 1, es soll daher nicht darauf eingetreten werden, ebenso sollen die senkrechten Schnitte durch die Anschlußniete des Pfostens nicht näher behandelt werden.

c) Stabkräfte und Momente.

Es wurden folgende Stabkräfte und Zentriermomente gemessen:

Zahlentafel 14. Stabkräfte am Knotenpunkt 4 *B*.

Stab	Schnitt	Stabkr. t	Moment cmt	Querkr. t
Untergurt $U_{2\text{-}4}$	Mitte	+44,05	+23,40	
	M	+41,58	+58,80	0,738
	G	+43,24	+64,50	
Untergurt $U_{4\text{-}6}$	*F*	+45,38		
	A	+23,87	−94,50	0,627
	Mitte	+25,27	−73,50	
Diagonale		+27,10	+16,20	0,90
Pfosten		−23,60	+ 2,60	

Der Abbau der Kräfte an Diagonale und Pfosten vollzieht sich folgendermaßen:

Zahlentafel 15. Kraftabbau in den Füllungsstäben.

Schnitt	Pfosten Kraft t	Pfosten Unterschied t	Diagonale Kraft t	Diagonale Unterschied t
1	−23,60	12,48	+27,10	8,94
2	−11,12	3,56	+18,16	5,59
3	− 7,56	2,36	+12,57	6,79
4	− 5,20	0,56	+ 5,78	5,78
5	− 4,64	4,64		

In diesen angeführten Zahlentafeln finden wir die bereits erwänten Kraftverhältnisse wieder.

d) Statische Untersuchungen.

Es soll nicht weiter darauf eingegangen werden. Um Gleichgewicht zu erhalten, sind an den gemessenen äußeren Kräften und Momenten verschiedene kleinere Veränderungen vorzunehmen.

VI. Theoretische Bestimmung der Verformungen sowie der Haupt- und Nebenspannungen des Probeträgers unter Berücksichtigung elastischer Knotenbleche.[1] (Tafel 14 bis 16.)

1. Allgemeines.

Wie aus den bisherigen Versuchsergebnissen zu entnehmen ist, stimmen weder Stabkräfte noch Spannungen mit denen des theoretisch berechneten Gelenkfachwerks vollständig überein. Die auftretenden starken Biegungsmomente lassen auf die Rahmenwirkung des Trägersystems schließen, die infolge der großen Querschnitte im Verhältnis zur geringen Stützweite durch die große Belastung in ausgeprägtem Maße zur Geltung kommt. Bei der Betrachtung der Spannungsverteilung in den verschiedenen Konstruktionsgliedern muß man zur Ansicht kommen, daß es kaum möglich sein wird, die theoretisch ermittelten Spannungen mit den gemessenen genau zur Uebereinstimmung zu bringen, indem zu viele einzelne Umstände, wie elastische Nietverformung, Montagefehler usw. die theoretisch angenommene Wirkungsweise verwischen. Am stärksten kommen diese Umstände bei den Knotenblechen zum Ausdruck, indem dort die verformten Querschnitte oft bedeutend von einer Ebene abweichen, da die Kraftangriffspunkte so eng beieinander sind, daß ein Spannungsausgleich im Material nicht stattfinden kann. Durch weitere eingehende Versuche würde es zwar möglich sein, die Dehnungskurven genauer zu erfassen, wovon jedoch die Praxis nur beschränkten Gebrauch machen würde, da die Ergebnisse zu unübersichtlich sein würden. Aus diesen angeführten Gründen wird immer eine Grenze zu ziehen sein zwischen theoretisch ermittelten und wirklich vorkommenden Spannungen.

Es soll nun im folgenden versucht werden, unter Beibehaltung der üblichen Annahmen ebenbleibender Querschnitte, ein Berechnungsverfahren für die Nebenspannungen, unter teilweiser Berücksichtigung der elastischen Verformung der Knotenbleche zu ermitteln, dessen Ergebnisse bedeutend näher an die Meßwerte herankommen, als dies nach den jetzigen Berechnungsverfahren der Fall ist.

2. Verfahren von Mohr.

Eine richtige Berechnung von Knotenblechen und von Fachwerken überhaupt kann nur durch Berücksichtigung der Nebenspannungen erfolgen. Hierzu hat Mohr ein besonders sinnreiches Näherungsverfahren geschaffen, das erlaubt, durch einfache Rechenverfahren die Einspannmomente der Stäbe zu bestimmen. (W. Gehler, Nebenspannungen eiserner Fachwerkbrücken.) Bei diesem Verfahren werden die Knotenbleche unendlich klein und starr und die Stäbe mit konstantem Querschnitt auf die ganze Systemlänge angenommen, was in Wirk-

[1] Bericht der techn. Kommission des Verbandes schweiz. Brückenbau- und Eisenbaufabriken. Nebenspannungen infolge vernieteter Knotenpunktsverbindungen eiserner Fachwerksbrücken. Juni 1922.
Schweiz. Bauzeitung vom 7., 14., 21. Oktober 1922.

lichkeit nicht der Fall ist. Werden die hieraus berechneten Einspannmomente mit den gemessenen Werten verglichen, so zeigt sich, daß diejenigen der Füllungsglieder bedeutend größer sind, als die rechnerischen Ergebnisse zeigen. Die freie Länge der Füllungsglieder und zuweilen auch die der Gurtungen wird infolge der ziemlichen Versteifung durch die Knotenbleche verkürzt und so die Aufnahmefähigkeit für Biegungsmomente vergrößert. Außer diesen Vernachlässigungen kommen noch weitere Umstände in Betracht, die die Nebenspannungen beeinflussen. Hiervon soll im folgenden Abschnitt die Rede sein.

3. Bestimmung der Nebenspannungen unter Berücksichtigung der Knotenblechform.

a) Versuche.

Auf Tafel 14 sind die am Probeträger *A* gemessenen Drehwinkel und Durchbiegungen für beide Belastungsfälle eingetragen. Die Messungen erstrecken sich über die verschiedensten Teile des Knotenbleches und der Fachwerkstäbe, woraus sich in sehr schöner Weise die Verformung des ganzen Trägersystems ergibt. Die aus den Messungen ermittelten Nullpunkte an den Füllungsgliedern sind entsprechend bezeichnet. Ueber die Durchführung der Messungen soll folgender Auszug Aufschluß geben.

Zahlentafel 16.

Bel.-Fall 1. Drehungsmessungen am Knotenpunkt 4 *A*. Fig. 66.

Allgemeines			Messungen					Ausmittlung						
Punkt	Seite	Apparat	0 t	50 t	0 t	50 t	0 t	1	2	3	4	Mittel	u	sec.
a	II	1	92,0	127,0	93,0	126,5	93,0	+35,0	+34,0	+33,5	+33,5	+34,0	3,02	**+102,5**
b	II	1	37,0	55,0	38,0	55,0	38,5	+18,0	+17,0	+17,0	+16,5	+17,1	3,02	**+ 51,5**
c	II	2	108,0	92,5	109,0	93,0	109,0	−15,5	−16,5	−16,0	−16,0	−16,0	4,00	**− 64,0**
d	II	2	34,0	7,0	34,0	7,5	34,5	−27,0	−27,0	−26,5	−27,0	−26,9	4,00	**−107,5**

μ = Beiwert in sec. für einen Teilstrich am Kilometer.

Bel.-Fall 1. Durchbiegungsmessungen am Untergurt. Fig. 64.

Punkt	Seite	Apparat	0 t	50 t	0 t	50 t	0 t	50 t	0 t	1	2	3	4	5	6	10^{-2} mm
2	Mitte	1	20,0	238,0	25,5	237,0	24,5	239,0	24,5	218,0	212,5	211,5	212,5	214,5	214,5	**213,9**
4	Achse	2	19,0	364,5	25,5	364,0	24,0	365,0	24,0	345,5	339,0	338,5	340,0	341,0	341,0	**340,8**
6	Achse	3	51,0	272,0	54,0	271,0	52,0	272,5	52,0	221,0	218,0	217,0	219,0	220,5	220,5	**219,3**

Die Durchbiegungsmessungen für Zwischenbelastungen wurden weggelassen.

Die in Fig. 64 dargestellte Verformung des Trägers im Belastungsfall 1 zeigt ein ziemlich symmetrisches Arbeiten desselben. Die Unterschiede an den beiden Auflagerplatten rühren davon her, daß diese nicht genau mit dem darauf befestigten Konstruktionsmaterial arbeiten. In den meisten Fällen betragen die Unterschiede zwischen den Drehungen entsprechender Punkte einige Sekunden. Aus der gemessenen Durchbiegungslinie geht hervor, daß das ganze Trägersystem sich senkt, indem außer den Lagerkörpern auch der Steg des Gegenträgers zusammengedrückt wird. Die Bestimmung der Senkungen des Trägers an den Lagerpunkten ist in Abb. 21 dargestellt. In den Fig. 65 und 66 sind die Verformungen der zwei Knotenpunkte, an denen die Spannungsmessungen vorgenommen wurden, dargestellt. Bei 3 *A* zeigt sich außer einer deutlichen Einsenkung

der Gurtwinkel auf der linken Seite eine Durchbiegung des Knotenbleches, verursacht durch die 50 t Last von oben und von unten durch die Gegenlast des Pfostens. Es ergeben sich so deutlich zwei Drehungs-Nullpunkte N am unteren Knotenblechrand. Am Knotenblech 4 A zeigen sich am wagerechten oberen Rand Drehungsunterschiede von 62 Sekunden. An der rechten Seite ist deutlich die heraufziehende Wirkung der Diagonale zu erkennen. Die ungleiche Verformung des linken Randes rührt von einer verstärkten Pressung des einen Pfostenanschlußnietes her. Am Knotenblech 4 A' zeigt sich die gleiche Erscheinung, wobei an Vor- und Rückseite des Randes bei entsprechenden Punkten keine großen Abweichungen gefunden wurden, so daß der ermittelte Drehungsunterschied nicht auf einem seitlichen Ausweichen des Bleches beruhen kann. Daß es nicht gleichgültig ist, wo das Klinometer angebracht wird, soll an den Diagonalanschlüssen gezeigt werden, wo die Drehungen des Flansches am Rand und tiefer gemessen wurden, Fig 66. Hierbei zeigten sich ganz bedeutende Unterschiede. Die Verdrehungen des Randes sind viel größer als die der Schichten näher am Steg. Die Verformung dieser Diagonalanschlüsse kommt durch die Messungen in kurzen Abständen sehr anschaulich zur Darstellung. Die beiden Untergurtwinkel arbeiten gut miteinander, indem die Drehungen der abstehenden Schenkel am gleichen Punkt fast gleich groß sind. Wenn man nun zurückgreift auf die großen Schwerpunktmomente, so ist sehr leicht verständlich, daß durch sie solch starke Verformungen sich zeigen müssen.

Beim Belastungsfall 2, Fig. 67, treffen wir ähnliche Verhältnisse an. Infolge der einseitigen Pressung dreht sich das ganze Trägersystem um 9,4″. Um diesen Betrag müssen die Drehwinkel verbessert werden, wenn sie auf eine wagerechte Achse bezogen werden sollen. Sehr deutlich zeigt sich die örtliche Einpressung unter der einwirkenden Last am betreffenden Knotenpunkt und die Wirkung des darunterliegenden Pfostens auf den Untergurt, der sich unter der Last durchbiegt. An allen Knotenblechen ist wieder eine große Verformung bemerkbar. In Fig. 68 und 69 sind die Drehungen der Knotenpunkte 3 A und 4 A wieder besonders herausgezeichnet. Wie das kleine Pfosteneinspannungsmoment von 31,38 cmt den oberen wagerechten Knotenblechrand von 4 A verformen kann, wird durch einen Drehwinkelunterschied von 138″ der beiden dem Pfosten nächstliegenden Messungen deutlich gemacht.

Die gleichen in der Tafel 14 aufgeführten Messungen wurden auch an den Trägern A' und B vorgenommen, teils in noch ausführlicherer Weise.

b) Ableitung der Theorie.

Da sich das Mohrsche Verfahren zur Berechnung von Nebenspannungen in seiner Einfachheit außerordentlich praktisch erweist, so soll der gleiche Weg beschritten werden, indem Stab- und Knotendrehwinkel beibehalten werden. Alle Berechnungen zur Ermittlung von Nebenspannungen nehmen unendlich kleine starre Knotenbleche an, wobei die Bedingung aufgestellt wird, daß sich die Winkel, welche die ans Knotenblech angeschlossenen Stäbe miteinander einschließen, nicht ändern. Da jedoch das Knotenblech eine endliche Größe hat, so werden die Biegungslinien der einzelnen Stäbe im Bereich desselben eine weniger gekrümmte Form einnehmen, als dies bei den bisherigen Berechnungsverfahren der Fall ist. Als Grenzfall ist der anzusehen, wo die Knotenbleche in ihrer ganzen Größe als starr angenommen werden; es würde dann die Biegungslinie der Stäbe im Bereich dieser Knotenbleche gerade

bleiben. Zwischen diesen beiden Grenzfällen, unendlich kleines starres Knotenblech und gewöhnliches starres Knotenblech, wird die Wirklichkeit liegen, indem sich an den Fachwerkstäben gegen den Systempunkt zu eine zunehmende Versteifung geltend macht. Aus dieser Ueberlegung kommt man dazu, als Annäherung einen bestimmten starren Knotenblechkern, Abb 22, anzunehmen, dessen Größe sich den bestehenden elastischen Verhältnissen anpaßt.

Je größer dieser Kern angenommen wird, um so mehr nimmt die Steifigkeit der Fachwerkstäbe zu und demnach auch ihre Aufnahmefähigkeit für Biegungsmomente. Durch die richtige Wahl der Größe des Kernes werden wir der Wirklichkeit bedeutend näher kommen. Um die Verhältnisse besser beurteilen zu können, soll vorerst auf das elastische Verhalten der Knotenbleche eingetreten werden.

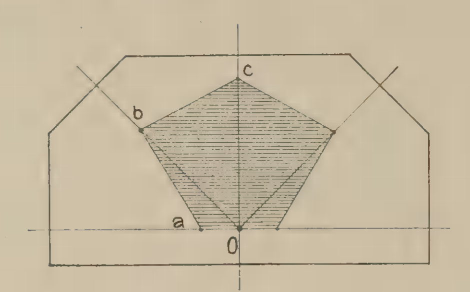


Abb. 22. Knotenblech mit starrem Kern.

Wie aus den in den Versuchen angegebenen Drehungsmessungen hervorgeht, sind die Knotenbleche sehr elastisch, so daß von einem einheitlichen Knotendrehwinkel nicht die Rede sein kann. Es wird daher kaum möglich sein, die rechnerisch ermittelten Knotendrehwinkel genau nachprüfen zu können. Selbst die Drehungen an den Stäben sind so veränderlich, daß es nicht gleichgültig ist, wo das Klinometer befestigt wird. Die elastische Verformung der Knotenpunkte wird erzeugt durch die Einwirkung der normalen Stabkräfte und Einspannmomente und in hohem Maße beeinflußt durch

a) die große Verformbarkeit der Nietanschlüsse,

b) die örtlichen Veränderungen an den Knotenblechen,

c) die Verbiegung der Knotenbleche infolge der örtlichen Abweichungen der Stabschwerachse von der Zentrierachse.

Die theoretische Erfassung der Verformbarkeit der Nietanschlüsse ist schwierig durchzuführen. Sie macht sich geltend durch eine Längenänderung infolge der Verformung der Nietschäfte und in einer Nachgiebigkeit in der Einspannung. Je mehr Niete ein Anschluß aufweist und je länger dieser Anschluß ist, wobei besonders an solche von Füllungsgliedern gedacht wird, um so geringer ist diese Verformung, indem die axialen und seitlichen Nietbeanspruchungen kleiner werden.

Die örtlichen Veränderungen an Knotenblechen machen sich durch die Unausgeglichenheit der Spannungsverteilungen infolge der konzentrischen örtlichen Krafteinwirkungen geltend. Im ferneren sind auch die seitlichen Ausweichungen hierher zu zählen.

Als nicht zu unterschätzender Einfluß ist die durch die örtlichen Exzentrizitäten zwischen Zentrierachse und Schwerachse verursachte Verformung zu betrachten.

Die in Abb. 23 und 24 dargestellten Momente infolge der Exzentrizität verursachen eine Verminderung der Steifigkeit des Knotenbleches, indem in beiden Fällen die hieraus hervorgehende Biegungslinie nach unten durchhängt. Die Knotenpunkte werden dadurch gelenkiger gemacht.

Für die theoretische Erfassung der Frage soll der Knotenblechkern als starres Gebilde bezeichnet werden, dessen Systempunkt mit demjenigen des theoretischen Systems übereinstimmt und dessen Größe durch die auf den Systemachsen gemessenen Steifigkeitsstrecken a, b, c in Abb. 22 gegeben ist. Diese Steifigkeitsstrecken hängen ab

a) von der Knotenblechform,
b) von der Art und Länge der Stabanschlüsse,
c) von der Steifigkeit der Anschlußstäbe und
d) von den am Knotenpunkt angreifenden Lasten.

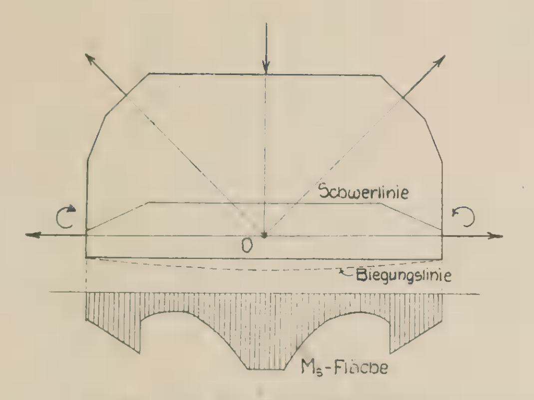


Abb. 23. Schwerpunktsmomente am Knotenpunkt 4 A.

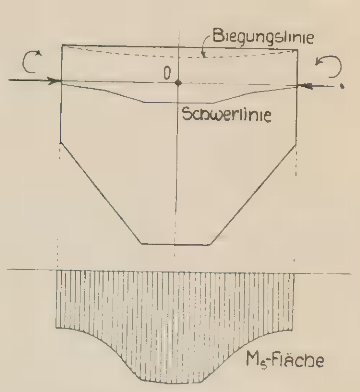


Abb. 24. Schwerpunktsmomente am Knotenpunkt 3 A.

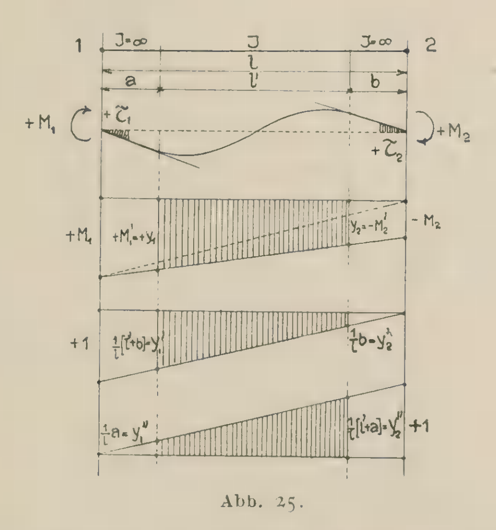


Abb. 25.

Sie sind diesen Umständen entsprechend zu wählen, da es schwierig ist, eine Formel zu ihrer rechnerischen Bestimmung aufzustellen. Dies ist besonders deshalb der Fall, weil, wie aus den folgenden Ergebnissen ersichtlich ist, die Stäbe um einen Knotenpunkt als gegenseitig auf die Anschlußlänge elastisch gekuppelt zu betrachten sind und einander bei Abweichungen der Schwerpunktachsen

von den Zentrierachsen bedeutend beeinflussen. Die Grenzen, in denen sie sich ändern, sind null und die Strecke zwischen erstem Anschlußniet, vom Blechrand an gerechnet, und dem Systempunkt. Die noch verbleibenden Stablängen erhalten das konstante Trägheitsmoment des betreffenden Stabes. Als Systemachsen sind die ideellen Schwerachsen dieser Stabteile zu betrachten, wobei die am Systempunkt sich ergebenden Exzentrizitäten, wenn diese Achsen nicht darin zusammenlaufen sollten, beibehalten werden.

Als Grundform diene ein Stab, dessen Systemlänge l ist und der an beiden Enden an den Strecken a und b ein ∞ großes Trägheitsmoment besitzt. Auf diesen Steifigkeitsstrecken ist die Biegungslinie gerade. Es bleibt somit nur noch eine frei deformierbare Strecke $l' = l - a - b$ mit konstantem Trägheitsmoment. Wir bestimmen die Drehwinkel an den Enden infolge der Einspannmomente M_1 und M_2, Abb. 25.

Es ist

$$M_1' = \frac{M_1}{l}(l' + b) - \frac{M_2}{l} a = \frac{1}{l}\{M_1(l' + b) - M_2 a\}$$

$$M_2' = \frac{M_2}{l}(l' + a) - \frac{M_1}{l} b = \frac{1}{l}\{M_2(l' + a) - M_1 b\}.$$

Allgemein ist

$$\tau_1 = \int_0^l \frac{M \bar{M}}{EJ} ds$$

$$= \frac{l'}{6EJ}[y_1(2y_1' + y_2') + y_2(2y_2' + y_1')],$$

indem gesetzt wird

$$y_1 = M_1' \qquad y_2 = -M_2'$$

$$y_1' = \frac{1}{l}(l' + b) \qquad y_2' = \frac{1}{l} b \text{ für } \tau_1$$

$$y_1'' = \frac{1}{l} a \qquad y_2' = \frac{1}{l}(l' + a) \text{ für } \tau_2.$$

Die Einsetzung dieser Werte in die Gleichung für τ liefert

$$\left.\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{l'}{6EJl^2}[M_1 2\{l'^2 + 3b(l' + b)\} - M_2\{l'^2 + 3l'(a + b) + 6ab\}] \\ \tau_2 &= \frac{l'}{6EJl^2}[M_2 2\{l'^2 + 3a(l' + a)\} - M_1\{l'^2 + 3l'(a + b) + 6ab\}] \end{aligned}\right\} \quad (20)$$

Wird als Abkürzung gesetzt

$$\begin{aligned} \{l'^2 + 3b(l' + b)\} &= A \\ \{l'^2 + 3a(l' + a)\} &= B \\ \{l'^2 + 3l'(a + b) + 6ab\} &= C, \end{aligned}$$

dann geht die Gl. (20) über in

$$\left.\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{l'}{6EJl^2}[2 M_1 A - M_2 C] \\ \tau_2 &= \frac{l'}{6EJl^2}[2 M_2 B - M_1 C] \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots (20a).$$

Werden diese Gleichungen nach den Momenten aufgelöst, so ergibt sich

$$\left.\begin{aligned} M_1 &= \frac{6EJl^2}{l'(4AB - C^2)}\{2\tau_1 B + \tau_2 C\} = M_{1\cdot 2} \\ M_2 &= \frac{6EJl^2}{l'(4AB - C^2)}\{2\tau_2 A + \tau_1 C\} = M_{2\cdot 1} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots (21).$$

Bezeichnet man den Knotendrehwinkel mit φ und den Stabdrehwinkel mit ψ, so ist nach Abb. 26

$$\tau_1 = \varphi_1 - \psi_{1\text{-}2}$$
$$\tau_2 = \varphi_2 - \psi_{1\text{-}2}\,.$$

Durch Einsetzung dieser Ausdrücke in Gl. (21) und durch Trennung der verschiedenen Drehwinkel erhält man allgemein

$$\left.\begin{aligned} M_{1\text{-}2} &= \frac{6\,EJl^2}{l'\,(4\,AB - C^2)}\,\{2\,B\,\varphi_1 + C\,\varphi_2 - \psi_{1\text{-}2}\,(2\,B + C)\} \\ M_{2\text{-}1} &= \frac{6\,EJl^2}{l'\,(4\,AB - C^2)}\,\{2\,A\,\varphi_2 + C\,\varphi_1 - \psi_{1\text{-}2}\,(2\,A + C)\} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad (22).$$

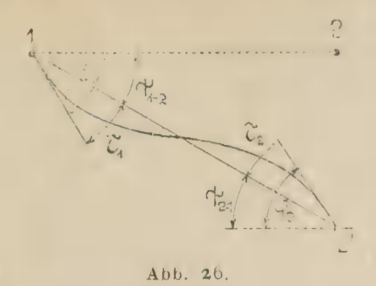


Abb. 26.

Es sind die Ausdrücke A, B, C als gewöhnliche Beiwerte, die nur von den Abmessungen des Stabes abhängen, zu betrachten. Setzen wir hierin $a = b = 0$, so wird $A = B = C = l'^2 = l^2$, und die Gleichungen (20) bis (22) nehmen die Form der Mohrschen Gleichungen an. Diese Beiwerte können unter Umständen vereinfacht werden, wenn die Versteifungsstrecken a und b gegenüber der Länge l klein sind. In diesem Falle ist es zulässig, das Doppelprodukt $a\,b$ wegzulassen.

Der von Mohr eingeführte Steifigkeitsgrad würde hier sein

$$N_{1\text{-}2} = \frac{6\,EJl^2}{l'(4\,AB - C^2)} = N_{2\text{-}1}\,.$$

Die Bestimmung der ideellen Knotendrehwinkel erfolgt nun wie bei Mohr. Es ist für einen Knotenpunkt

$$0 = \Sigma M = 2\,\varphi_1\,\Sigma\,B N_{1\text{-}\varrho} + \Sigma\,C\,\varphi_\varrho\,N_{1\text{-}\varrho} - \Sigma\,(2\,B + C)\,\psi_{1\text{-}\varrho}\,N_{1\text{-}\varrho} \quad . \quad (23),$$

wobei mit ϱ alle diejenigen Punkte bezeichnet sind, die durch Stäbe mit dem Punkt 1 verbunden sind. Um hieraus φ_1 bestimmen zu können, suchen wir vorerst einen Vergleich zwischen den Werten der Beiwerte B und C zu erhalten. Es zeigt sich, daß bei kleinen Fachwerkhöhen C wesentlich größer werden kann als B. Um ein Verhältnis zwischen beiden Größen zu erhalten, nehmen wir den Sonderfall $a = b$. Dann wird

$$B = l'^2 + 3\,a\,l' + 3\,a^2$$
$$C = l'^2 + 6\,al' + 6\,a^2 = B + 3\,al' + 3\,a^2$$
$$C = B\left(1 + \frac{3\,al' + 3\,a^2}{l'^2 + 3\,al' + 3\,a^2}\right) = B\,\nu\,.$$

Hieraus ergibt sich, daß der Verhältniswert ν immer größer als 1 ist oder im Grenzfall, wenn $a = b = 0$, zu 1 wird.

Da diese Werte $\nu = \frac{C}{B}$ sehr leicht zu bestimmen sind, so ist es möglich, für jeden Knotenpunkt einen Mittelwert der ν aller anschließenden Stäbe zu erhalten.

Es ergibt sich dann entsprechend der Mohrschen Näherungsgleichung

$$\nu_{mittel}\, \varphi_1 \Sigma B N_{1\text{-}\rho} = \Sigma \varphi_\rho\, C N_{1\text{-}\rho},$$

hieraus folgt bei Einsetzung in Gl. (23)

$$\varphi_1{}' = \frac{\Sigma (2 B + C) \psi_{1\text{-}\rho} N_{1\text{-}\rho}}{(2 + \nu_m) \Sigma B N_{1\text{-}\rho}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (24).$$

$\varphi_1{}'$ hat als erster Annäherungswert zu gelten. Bei Berücksichtigung von exzentrischen Momenten K wird der Knotendrehwinkel

$$\varphi_1{}' = \frac{\Sigma (2 B + C) \psi_{1\text{-}\rho} N_{1\text{-}\rho} + \Sigma K}{(2 + \nu_m) \Sigma B N_{1\text{-}\rho}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (24a).$$

Genauere Werte erhält man, wenn die Gl. (23) durch $2 \Sigma B N_{1\text{-}\rho}$ geteilt wird. Dann wird der Knotendrehwinkel

$$\varphi_1{}'' = \frac{2 + \nu_m}{2} \varphi_1{}' - \frac{\Sigma C \varphi_\rho N_{1\text{-}\rho}}{2 \Sigma B N_{1\text{-}\rho}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (25),$$

wobei für φ'_1 die aus den Gleichungen (24) und (24a) erhaltenen Werte einzusetzen sind, ebenso für die φ_ρ. Nach mehrmaliger Wiederholung, wobei nur die φ_ρ der vorhergehenden Berechnung neu einzusetzen sind, nimmt der Knotendrehwinkel einen festen Wert an.

Die Stabdrehwinkel ψ werden aus einem gewöhnlichen Verschiebungsplan bestimmt. Hierzu sind die Längenänderungen der Systemstäbe zu ermitteln. Um der Wirklichkeit nahe zu kommen, können verschiedene Annahmen gemacht werden.

a) Bei zentrischer Beanspruchung und unveränderlichem Querschnitt des Stabes auf die ganze Länge ist

$$\Delta l = \frac{P l}{E F}.$$

b) Bei zentrischer Beanspruchung und veränderlichem Querschnitt des Stabes ist

$$\Delta l = P \Sigma \frac{l_s}{E F_s},$$

wobei l_s und F_s Länge und Querschnittsfläche der einzelnen Stabstücke bedeutet. Dieser Fall käme bei Stößen und zentrisch liegenden Knotenblechen in Betracht.

c) Bei teilweise exzentrischer Beanspruchung, wie dies der Fall bei unsymmetrischen Querschnitten und Knotenblechanschlüssen ist, kommen außer den Dehnungen infolge der Stabkraft noch Aenderungen der Systemlängen infolge der Biegungsmomente aus den Exzentrizitäten vor. Bei einfachen Knotenpunkten, wie z. B. 3 A, ist es nicht schwierig, darauf näher einzugehen; bei solchen, wie z. B. 4 A, kommen jedoch Schwierigkeiten hinzu, indem die Diagonalen und bei unsymmetrischer Belastung auch der Pfosten infolge dieser Momente in Mitleidenschaft gezogen werden.

Man wird daher nicht weit fehl gehen, wenn die Längenänderungen nach a) bestimmt werden, und die Gelenkigmachung infolge der Abweichungen von Schwerachse und Zentrierachse in den Knotenpunkten durch Verkleinerung der Steifigkeitsstrecken an den Gurtstäben berücksichtigt wird. Der Praxis wird dadurch auch am meisten gedient sein, indem bei c) schon ein großer Aufwand erforderlich ist.

Die Einspannmomente ergeben sich aus den Knoten- und Stabdrehwinkeln, wenn sie in Gl. (22) eingesetzt werden. Im allgemeinen Fall ist für einen Punkt a mit benachbartem Punkt n

$$M_{an} = N_{an} [2 B \varphi_a + C \varphi_n - \psi_{an} (2 B + C)].$$

Zahlentafel 17.

Bel.-Fall 1.

Berechnung der Einspannmomente und Stabkräfte des Probeträgers.

Knot.-Punkt	Stab	Allgemeines							1. Berechnung						
		F	J	B_n	C_n	N_n	r	Grundwerte S	S	ψ	φ'	φ'''	M	ΔS	δ
Nr.	Nr.	cm²	cm⁴	10⁴ cm²	10⁴ cm²	tcm²	$\frac{\Sigma C}{\Sigma B}$	t	t	10⁻⁴	10⁻⁴	10⁻⁴	cmt	t	10⁻² mm
0	0–1	62,0	864	3,80	5,87	1,62	—	−35,40	−35,59	+ 8,68	—	—	+ 71,6	+0,20	—
	0–2	70,6	3970	2,59	2,47	7,78	—	+25,00	+25,36	+11,45	+10,0	+ 9,82	− 71,6	+0,40	0
	Σ	—	—	6,39	8,34	—	1,31	—	—	—	—	—	0,0	—	—
1	1–0	62,0	864	3,80	5,87	1,62	—	−35,40	−35,59	+ 8,68	—	—	+ 88,9	+0,20	—
	1–2	37,6	316	2,45	2,80	1,32	—	0,00	+ 1,40	+ 4,16	—	—	+ 98,4	+0,92	—
	1–3	89,4	8363	2,41	2,38	13,05	—	−50,00	−47,05	+11,85	+ 9,68	+15,10	−168,7	+3,15	—
	1–4	48,0	1850	3,78	5,90	3,77	—	+35,40	+29,65	+ 5,45	—	—	+150,9	−7,60	—
	Σ	—	—	12,44	16,95	—	1,36	—	—	—	—	—	+169,5	—	—
2	2–0	70,6	3970	1,69	2,47	7,78	—	+25,00	+25,36	+11,45	—	—	− 28,3	+0,40	—
	2–1	37,6	316	1,50	2,80	1,32	—	0,00	+ 1,40	+ 4,16	+ 9,24	+11,75	+ 69,3	+0,92	169
	2–4	70,6	3970	1,96	2,38	6,21	—	+25,00	+25,79	+ 8,27	—	—	− 41,0	+1,52	—
	Σ	—	—	5,15	7,65	—	1,48	—	—	—	—	—	0,0	—	—
3	3–1	89,4	8363	1,96	2,38	13,05	—	−50,00	−47,05	+11,85	—	—	−506,0	+3,15	—
	3–4	60,4	681	1,75	2,98	4,28	—	−50,00	−44,24	0,00	0	0	0,0	+9,00	—
	3–5	89,4	8363	1,96	2,38	13,05	—	−50,00	−47,05	−11,85	—	—	+506,0	+3,15	—
	Σ	—	—	5,67	7,74	—	1,36	—	—	—	—	—	0,0	—	—
4	4–1	48,0	1850	3,78	5,90	3,77	—	+35,40	+29,65	+ 5,45	—	—	+ 59,0	−7,60	—
	4–2	70,6	3970	2,41	2,38	6,21	—	+25,00	+25,79	+ 8,27	—	—	−196,0	+1,52	—
	4–3	60,4	681	2,02	2,98	4,28	—	−50,00	−44,24	0,00	0	0	0,0	+9,00	286
	4–5	48,0	1850	5,78	5,90	3,77	—	+35,40	+29,65	− 5,45	—	—	− 59,0	−7,60	—
	4–6	70,6	3970	2,41	2,38	6,21	—	+25,00	+25,79	− 8,27	—	—	+196,0	+1,52	—
	Σ	—	—	14,40	19,54	—	1,35	—	—	—	—	—	0,0	—	—

Exzentr. Moment $M_1 = 3{,}6 \cdot 47{,}05 = +\ 169{,}5$ cmt

Knot.-Punkt	Stab	2. Berechnung							
		S	ψ	φ'	φ'''	M	ΔS	S	δ
Nr.	Nr.	t	10⁻⁴	10⁻⁴	10⁻⁴	cmt	t	t	10⁻² mm
0	0–1	−35,20	+ 8,60	—	—	+ 66,7	+0,21	−35,19	—
	0–2	+25,40	+11,30	+9,88	+10,00	− 66,7	+0,35	+25,35	0
	Σ	—	—	—	—	0,0	—	—	—
1	1–0	−35,20	+ 8,60	—	—	+ 82,7	+0,21	−35,19	—
	1–2	+ 0,92	+ 4,20	—	—	+ 91,1	+0,80	+ 0,80	—
	1–3	−46,85	+11,00	+9,17	+14,22	−145,9	+2,82	−47,18	—
	1–4	+27,80	+ 5,20	—	—	+140,8	−6,90	+28,50	—
	Σ	—	—	—	—	+168,7	—	—	—
2	2–0	+25,40	+11,30	—	—	− 30,4	+0,35	+25,35	—
	2–1	+ 0,92	+ 4,20	+8,97	+11,26	+ 64,5	+0,80	+ 0,80	168,4
	2–4	+26,52	+ 7,80	—	—	− 34,1	+1,39	+26,39	—
	Σ	—	—	—	—	0,0	—	—	—
3	3–1	−46,85	+11,00	—	—	−462,0	+2,82	−47,18	—
	3–4	−41,00	0,00	0	0	0,0	+8,10	−41,90	—
	3–5	−46,85	−11,00	—	—	+462,0	+2,82	−47,18	—
	Σ	—	—	—	—	0,0	—	—	—
4	4–1	+27,80	+ 5,20	—	—	+ 52,0	−6,90	+28,50	—
	4–2	+26,52	+ 7,80	—	—	−182,5	+1,39	+26,39	—
	4–3	−41,00	0,00	0	0	0,0	+8,10	−41,90	285,1
	4–5	+27,80	− 5,20	—	—	− 52,0	−6,90	+28,50	—
	4–6	+26,52	− 7,80	—	—	+182,0	+1,39	+26,39	—
	Σ	—	—	—	—	0,0	—	—	—

Exzentr. Moment $M_1 = 3{,}6 \cdot 46{,}85 = +\ 168{,}7$ cmt

Es muß nun die Summe sämtlicher Einspannmomente um einen Knotenpunkt gleich null oder bei Exzentrizität gleich dem Momente K sein. Infolge der Näherungsberechnung wird diese Bedingung nicht genau erfüllt sein, man verbessert daher die einzelnen Werte noch, indem der Fehler entsprechend den Steifigkeiten N auf die einzelnen Stäbe verteilt wird.

Ueben die Einspannmomente, wie dies bei diesem Probeträger der Fall ist, einen großen Einfluß auf die Stabkräfte aus, so ist notwendig, diese zu bestimmen und den Berechnungsvorgang zu wiederholen. Auch über die Berechnung der Zusatzstabkräfte ist von Mohr ein einfaches Verfahren angegeben worden. Bei dieser Wiederholung ergeben sich neue Einspannmomente und Stabkräfte, wobei diese von den Ausgangswerten nicht mehr stark abweichen. Da die Stabkräfte nur in den Längenänderungen zur Geltung kommen und so die Stabdrehwinkel ψ stark beeinflussen, so ist ohne weiteres klar, daß, je genauer die Längenänderungen bestimmt worden sind, sich die neuen Stabkräfte umsomehr der Wirklichkeit nähern.

Es wird gut sein, den Zuwachs der Querschnitte bei Stößen nicht zu berücksichtigen, weil die hierdurch entstehende geringere Dehnung durch die Deformation der Laschenanschlußniete reichlich ausgeglichen wird.

c) Anwendung des Verfahrens und Vergleich mit den Messungen.

In Tafel 15 sind die Einspannungsmomente und Durchbiegungen nach dem gewöhnlichen Verfahren von Mohr und nach dem abgeänderten Verfahren berechnet, eingezeichnet und mit den Meßergebnissen in Vergleich gezogen worden. Die hierbei gewählten Versteifungsstrecken sind in Fig. 70 dargestellt. Hieraus geht hervor, daß sie bei den Gurtstäben klein gehalten wurden infolge der bereits erwähnten Gelenkigmachung durch die Exzentrizitäten in diesen Stäben. Bei den Punkten 2 und 6 fallen die Versteifungsstrecken der Gurtungen ganz weg, da keine Knotenbleche vorhanden sind; ebenso ist dies der Fall bei Punkt 3 im Belastungsfall 1, weil die Biegungsbeanspruchungen durch die unmittelbar wirkende Last jede Steifigkeit des Knotenbleches aufhebt. Die Füllungsglieder weisen große Versteifungsstrecken auf, da in unserem Fall diese durch die Knotenbleche wesentlich versteift werden. Die Versteifungsstrecken der Diagonalen betragen 420 mm, während sie bei völlig starrem Anschluß 465 mm messen würden; bei den Mittelpfosten wurden unten die starre Strecke bis zum ersten Anschlußnietpaar infolge des starken Widerstandes des Knotenbleches gegenüber dem wenig steifen Profil dieses Stabes angenommen. Das gleiche ist der Fall bei den Pfostenstäben im Punkt 2 und 6, wo das Gurtstehblech eine fast völlige Einspannung auf seiner ganzen Breite bewirkt. Bei einem ersten Rechnungsvorgang wurden die Versteifungsstrecken der Füllungsglieder wesentlich kleiner gehalten, als es bei diesen Angaben der Fall ist, und die hieraus sich ergebenden Einspannmomente konnten nicht als befriedigend angesehen werden. Allerdings waren sie bereits besser als die nach Mohr berechneten Werte. Auffallend ist, daß der starre Knotenblechkern an den Füllungsgliedern fast bis zu den äußersten Anschlußnieten reicht, da doch die Elastizität der Anschlüsse selbst eine Verminderung ergeben müßte. Hierbei kommen wir auf die bei der Bestimmung der ψ erwähnte Beeinflussung der Einspannmomente der Füllungsglieder infolge der Abweichung der Schwerachse der Gurtungen von der Zentrierachse zurück. Infolge dieser entstehenden sekundären Verbiegungen der Gurtungen werden auch die anschließenden Füllungsstäbe mit verbogen, da sie durch die Knotenbleche unmittelbar mit den Gurtstäben gekuppelt sind. Es kann daher der Fall eintreten, daß die

Versteifungsstrecke oft noch über das Knotenblech hinausreichen müßte, um die wirklichen Werte zu erhalten. Die Versteifungsstrecken werden somit wesentlich von der Belastung beeinflußt, sofern eine Abweichung zwischen Schwerachse und Zentrierachse an den Knotenpunkten vorkommt.

Der Abkürzung wegen sollen nur einige Angaben aus der Berechnung des Probeträgers im Belastungsfall 1 gemacht werden. Zahlentafel 17 S. 73.

Aus dieser Zahlentafel ist ersichtlich, daß die Mittelwerte ν sich nicht stark ändern. Bei der ersten Berechnung wurden bereits die Stabkräfte S von einer früheren Berechnung entlehnt und ebenso die ψ. Der Vergleich der φ' und φ'''' zeigt, welchen Knotendrehwinkel man bei der ersten Annäherung erhält und wie groß er nach vier wiederholten Berechnungen wird. Der Einfluß der Einspannmomente M auf die Stabkräfte geht aus der Zahlentafel für ΔS hervor, und man muß sich daher nicht wundern, wenn bei den Messungen die Stabkräfte von denen des Gelenkfachwerkes so stark verschieden waren. Bei der Bestimmung der neuen Stabkräfte im Rahmensystem müssen diese ΔS zu den Stabkräften des Gelenkfachwerks hinzugezählt werden. Die Endwerte S der Stabkräfte weichen bei der zweiten Berechnung nicht mehr stark von den Ausgangswerten ab, woraus man erkennen kann, daß die Werte der Einspannmomente und Durchbiegungen nur noch wenig von denen des genauen Berechnungsverfahrens abweichen.

Die folgende Zahlentafel 18 soll einen Vergleich der nach den verschiedenen Verfahren berechneten Werte geben.

Zahlentafel 18. Vergleich gemessener und berechneter Werte.

Stab	Stabkräfte in t					Knotendrehwinkel in sec					Durchbiegungen in mm			
	Gelenk	Mohr	Elast. Kn.	Messung		Knotp.	Mohr	Elast. Kn.	Messung		Gelenk	Mohr	Elast. Kn.	Messung
				A	A'				min	max				
Bel. Fall 2														
1—3	—25,0	—25,65	—26.01		**—26.60**	0	+342	+350	**+285**	**+446**	0	0	0	0
3—5	—25,0	—25,37	—24,90		**—25,99**	1	+ 25	+ 23	**+ 20**	**—290**	2,11	2,06		
2—4	+37,5	+36,46	+36,19	**+34,13**	**+34.48**	2	+111	+107	**+ 92**	**+135**	2,11	2,01	1,93	**1,90**
4—6	+12,5	+12,63	+12,99	**+12.37**	**+12,57**	3	— 79	— 81	**— 81**	**—140**	1,71	1,73		
3—4	0,0	— 0,75	— 0,27	**— 0,23**	**— 0.30**	4	— 85	— 59	**— 77**	**— 243**	1,71	1,72	1,68	**1,68**
4—1	—17,6	—15,12	—14,21	**—13.64**	**—13,64**	5	—146	- 125	**— 81**	**—180**	0,92	0,93		
4—5	+17,6	+17,73	+16,35	**+17,75**	**+16,78**	6	—121	—129	**—127**	**—144**	0,92	0,93	0,93	**0,96**
1—2	0,0	— 2,15	— 2,63		**— 2,00**	7	—121	—120	**—116**	**—146**	0	0	0	0
Bel. Fall 1														
1—3	—50,0	—47,49	—47,18	**— 49.30**	**—48.20**	0	+213	+206	**+181**	**+294**	0	0	0	0
2—4	+25,0	+25,33	+26,39	**+24 93**	**+25,81**	1	+376	+293	**+262**	**+398**	1,72	1,69		
3—4	—50,0	—44,97	—41,90	**—39 64**	**—42,18**	2	+234	+232	**+237**	**+250**	1,72	1,72	1,68	**1,64**
1—4	+35,4	+30,66	+28,50	**+28,96**	**+28,97**	3	0	0	0	**+146**	3,75	3,48		
0—1	—35,4	—35,24	—35,19			4	0	0	0	**+148**	3,17	2,96	2,85	**2,86**

Aus dieser Zusammenstellung geht hervor, daß es bei den Stabkräften und Knotendrehwinkeln nicht mehr möglich ist, die aus dem Mohrschen Verfahren und dem Verfahren der elastischen Knotenbleche sich ergebenden Werte durch Messungen einzeln nachzuprüfen, indem diese berechneten Werte vielfach innerhalb der Fehlergrenze liegen. Bei den Knotendrehwinkeln wurde der kleinste und größte gemessene Drehwinkel am Knotenpunkt angegeben. Die Unter-

Zahlentafel 19.

Schnitt Nr.	Zeichnung	F_b cm²	F_{net} cm²	r_i cm	J_n cm⁴	W_o W_u cm³	Rechnungsart	P t	M_s cmt	Q t	σ_P t/cm²	σ_{Mo} t/cm²	σ_{Mu} t/cm²	σ_o t/cm²	σ_u t/cm²	τ_{max} t/cm²	σ_{max} t/cm²	Bemerkung
	Allgemeines						Kräfte				Spannungen							
Bel.-Fall I.							Knotenpunkt 4 *A*.											$r_z = 6,0$ cm
	2 I 165·7,8	—	—	—	—	246	Gelenkfachw.	+25,0	— 35,5	0	+0,353	−0,143	+0,068	+0,210	+0,421	0,0	+0,421	
A	21φ 2 i 70·8 2 Γ 80·8	77,68	70,96	7,42	4287	—	Elast. Knotbl.	+26,39	−152,0	+ 1,45	+0,373	−0,618	+0,291	−0,245	+0,664	—	+0,664	
	1 – 203·8	—	—	—	—	522	Messung	+24,90	−141,9	+ 1,02	—	—	—	−0,260 −0,314	+0,527 +0,532	—	+0,532	Am Nietloch ∾ 0,90
	1 I 480·12	—	—	—	—	710	Gelenkfachw.	+50,00	−192,5	+25,0	+0,507	−0,271	+0,125	+0,236	+0,632	+0,653	* +0,907	Mitte Knotenbl.
F	2 Γ 80·8 1 – 203·8	98,42	98,42	14,60	23700	—	Elast. Knotbl.	+47,18	−336,8	+20,96	+0,480	−0,474	+0,218	+0,006	+0,698	+0,546	* +0,750	Mitte Knotenbl.
		F_{st}	57,60	—	—	1540	Messung	+44,64	−305,9	+20,77	—	—	—	−0,322 −0,255	+0,720 +0,703	+0,567	+0,928	Mitte Knotenbl.
	1 I 480·12	—	—	—	—	575	Gelenkfachw.	+50,00	−282,0	+12,50	+0,607	−0,490	+0,206	+0,117	+0,813	+0,416	+0,813	
F_a	2 Γ 80·8 1 – 203·8	98,42	82,46	13,65	19750	—	Elast. Knotbl.	+47,18	−406,7	+10,51	+0,572	−0,708	+0,298	−0,136	+0,870	+0,350	+0,870	Mitte Knotenbl = 0,579 *
		F_{st}	45,00	—	—	1365	Messung	+44,64	−377,7	+10,38	—	—	—	−0,600	+0,950	+0,380	+0,950	Am Nietloch ∾ 1,40
		—	—	—	—	—	Gelenkfachw.	+35,40	0,0	0,0	+0,768	0,0	0,0	+0,768	+0,768	—	+0,768	
O	2 C № 16	46,20	46,20	0	1850	232	Elast. Knotbl.	+28,50	+ 5,0	0,91	+0,618	+0,022	−0,022	+0,640	+0,596	—	+0,640	
		F_{st}	22,40	—	—	—	Messung	+28,86	+13,18	0,91	—	—	—	+0,669 +0,678	+0,558 +0,548	—	+0,817	Am Steg!

Stab	Querschnitt																	
P	4 ┏ 80·9	—	—	—	—	—	Gelenkfachw.	−50,0	0,0	0,0	−0,875	0,0	0,0	−0,875	−0,875	—	−0,875	
		57,24	57,24	0	610	76	Elast. Knotbl.	−41,90	0,0	0,0	−0,732	0,0	0,0	−0,732	−0,732	—	−0,732	
		—	—	—	—	—	Messung	−41,54	0,0	0,0		—	0,0	−0,790 −0,810	−0,755 −0,804	—	−0,890	

Bel.-Fall I. Knotenpunkt $3A'$. $\eta_2 = 9{,}6$ cm

Stab	Querschnitt																	
Mitte Stab	1 — 203·8 2 ┏ 80·8 1 ǀ 248·8 2 ǀ 70·7,0 2 ┏ 70·7	—	—	—	—	806	Gelenkfachw.	−50,0	+ 60,0	0,0	−0,498	−0,074	+0,090	−0,572	−0,408	—	−0,572	
		100,32	100,32	10,8	9355	—	Elast. Knotbl.	−47,18	+214,6	4,05	−0,470	−0,266	+0,321	−0,736	−0,149	0,307	−0,736	Mitte Knotenbl. = 0,599
		F_{st}	19,80	—	—	669	Messung	−48,20	+196,9	3,00	—	—	—	−0,718 −0,690	−0,185	—	−0,718	
i	1 — 203·8 2 ǀ 70·8 2 ┏ 80·8 2 ǀ 165·8 2 ┏ 70·7	—	—	—	—	807	Gelenkfachw.	−50,0	+ 17,5	0,0	−0,514	−0,022	+0,030	−0,536	−0,484	—	−0,536	
		97,16	97,16	9,95	8699	—	Elast. Knotbl.	−47,18	+352,5	4,05	−0,486	−0,437	+0,603	−0,923	+0,117	—	−0,923	
		—	—	—	—	585	Messung	−46,17	+287,1	3,05	—	—	—	−0,900 −0,822	+0,119 +0,140	—	−0,900	
g	1 — 203·8 2 ┏ 80·8 1 ǀ 455·12	—	—	—	—	1420	Gelenkfachw.	−50,0	+195,0	0,0	−0,525	−0,137	+0,306	−0,662	−0,219	—	−0,662	
		95,4	95,4	13,52	20380	—	Elast. Knotbl.	−47,18	+592,5	4,05	−0,495	−0,417	+0,928	−0,912	+0,433	0,111	−0,912	
		F_{st}	54,6	—	—	637	Messung	−43,7	+48,05	3,00	—	—	—	−0,815 −0,666	−0,051	0,238	−0,926	Am Gurtwinkel
P'	4 ┏ 80·9	—	—	—	—	—	Gelenkfachw.	−50,0	0,0	0,0	−0,865	—	—	−0,865	−0,865	—	−0,865	
		57,84	57,84	0	610	76	Elast. Knotbl.	−41,9	0,0	0,0	−0,725	—	—	−0,725	−0,725	—	−0,725	
		—	—	—	—	—	Messung	−42,18	0,0	0,0	—	—	—	−0,870 −0,779	−0,785 −0,771	—	−0,870	

* Bei der theoret. Berechnung $\sigma_{max} = 0{,}50\,\sigma \pm 0{,}50\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$

$$\tau_{max} = {}^3/_2 \frac{Q}{F_{st}}$$

schiede sind oft sehr groß. Wenn wir jedoch die Figuren 64 bis 69 auf Tafel 14 näher betrachten, so zeigt sich doch, daß dieser theoretische Knotendrehwinkel auch in Wirklichkeit vorhanden ist. Es ist nämlich auffällig, wie die an den wenig steifen Pfostenwinkeln in der Nähe der Systempunkte gemessenen Verdrehungen mit den theoretischen Werten oft nahezu übereinstimmen. Diese Pfostenwinkel nehmen infolge ihrer Nachgiebigkeit im Systempunkt die Lage des Knotenblechkernes an und ermöglichen so die Nachprüfung. Die nach dem Verfahren der elastischen Knotenbleche berechneten Durchbiegungen stimmen fast genau mit den Messungen überein.

Der Hauptunterschied der beiden Verfahren liegt in den Ergebnissen der Einspannmomente. Es ist umständlich, diese Ergebnisse in eine Zahlentafel zu bringen, sie sind daher in Tafel 15 zeichnerisch dargestellt. Vor allem ist hieraus ersichtlich, in welchem Maße die Füllungsglieder mehr Biegung erhalten, als dies gegenüber den Ergebnissen nach Mohr der Fall ist. In mehreren Fällen sind sie trotzdem noch kleiner als die an den betreffenden Schnitten gemessenen Momente. Diese Unterschiede können nur aus der Nebenbeeinflussung durch die Gurtungen erklärt werden. Wie weit in Fig. 71 die Steifigkeit des Knotenbleches am Punkt 3 infolge der unmittelbar wirkenden Last heruntergedrückt wird, geht aus den dort gemessenen Momenten hervor, die alle kleiner sind als die theoretischen Werte. Jedoch weist auch hier die gemessene Momentenlinie auf eine bedeutende Einspannung des Obergurtes an den beiden Endpunkten 1 und 5 hin. Die Mohrsche Linie weist dieses Merkmal nicht auf. Es soll nicht auf alle Punkte eingegangen werden; im allgemeinen kann gesagt werden, daß sich in den meisten Punkten eine gute Uebereinstimmung zwischen den durch das Verfahren der Versteifungsstrecken erhaltenen Momenten und den gemessenen Werten ergibt. Die Ueberlegungen zur Wahl der Größe der Steifigkeitsstrecken waren richtig.

Wir haben es bei diesem Probeträger mit einem Sonderfall zu tun, weil ein kleines Bauwerk mit großer Belastung vorliegt, und weil die einzelnen Konstruktionsfehler sich bei allen Messungen geltend machen. Bei größeren Bauwerken, wo sich die Konstruktionsfehler möglicherweise gegenseitig ausgleichen können und wo nicht so konzentrierte Lasten im Verhältnis zum Bauwerk vorkommen, werden gemessene und berechnete Werte besser übereinstimmen. Es werden auch die aus den Einspannmomenten sich ergebenden Zusatzkräfte im Vergleich zu den wirkenden Stabkräften kleiner sein und meistens eine zweite Berechnung nicht mehr notwendig machen.

Kurz zusammenfassend kann gesagt werden, daß das Verfahren mit den Versteifungsstrecken eine Abänderung der Mohrschen Berechnungsmethode zur Berechnung der Nebenspannungen in Fachwerken ist, das den vorkommenden konstruktiven Verhältnissen besser Rechnung tragen kann, und dessen Ergebnisse besser mit den Meßwerten übereinstimmen. Die einzuführenden Versteifungsstrecken sind so zu wählen, daß außer den konstruktiven Verhältnissen auch der Belastungszustand berücksichtigt wird. Durch weitere Untersuchungen wird es möglich sein, auch diese Strecken durch Rechnung besser erfassen zu können.

d) Bestimmung der Spannungen am Probeträger. (Tafel 16.)

Nachdem die Einspannmomente und die neuen Stabkräfte ermittelt sind, soll die Berechnung der Spannungen unter der Annahme ebenbleibender Querschnitte vorgenommen werden. Die Zahlentafel 19 S. 76 gibt die Spannungen von Knotenblech 4 A und 3 A' bekannt, wobei die Ergebnisse von Gelenkfach-

werk und Rahmen mit Versteifungsstrecken mit denen der Messung in Vergleich gebracht werden. Sie sind zur besseren Erklärung in den Fig. 73 bis 75 der Tafel 16 dargestellt. Der Abkürzung wegen sollen nur einige Schnitte rechnerisch behandelt werden.

Zu der vorgehenden Zahlentafel 19 ist zu erwähnen, daß bei der Berechnung der Normalspannungen in den senkrechten Schnitten durch das Knotenblech die Abweichung der Schwerpunkte von der Zentrierachse auch beim Gelenkfachwerk berücksichtigt wurde. Hierdurch entstehen die dort aufgeführten Biegungsmomente. Bei der theoretischen Bestimmung der σ_{max} und τ_{max} wurden die allgemein verwendeten Formeln benützt, während die gemessenen σ_{max} aus den durch Messungen bestimmten Hauptspannungen des Knotenbleches oder Gurtrandes gewonnen wurden.

Bei der allgemeinen Betrachtung der Verteilung der Normalspannungen in den Gurtungen zeigt sich in den Fig. 73 bis 75, daß das angewendete Verfahren der elastischen Knotenbleche vielfach Werte liefert, die sehr gut mit den Randmessungen übereinstimmen, während beim Gelenkfachwerk die Abweichungen bedeutend sind. Aus den eingezeichneten geraden Deformationslinien ist sehr schön zu ersehen, in welchem Maße sich die gemessenen Spannungen infolge der örtlichen Angriffspunkte der Niete und infolge ihrer Verformung ändern. Um genaue Kenntnis der Verteilung der Schubspannungen zu erhalten, müßten weitere Dehnungsmessungen unter verschiedenen Richtungen an Laschen und Gurtteilen vorgenommen werden.

Bei den Diagonalen sind die gemessenen größten Normalspannungen bedeutend größer, als sie sich nach dem Verfahren der elastischen Knotenbleche ergeben, trotzdem Stabkräfte und Momente nahezu übereinstimmen. Sie nähern sich den Spannungswerten des Gelenkfachwerkes, wie aus der vorigen Zahlentafel hervorgeht, oder übersteigen diese noch, wie die Fig. 74 zeigt. Der Grund liegt in der ungleichmäßigen Spannungsverteilung über dem Querschnitt, was durch theoretische Berechnungen nicht erfaßt werden kann. Aehnliche Spannungszustände werden die durch die ersten Anschlußniete gelegten ungünstigsten Schnitte aufweisen, wobei noch die Erhöhung der Spannungen am Lochrand hinzukommt.

Für den Pfosten gelten die gleichen Erwägungen wie bei den Diagonalen, sofern sie ebenfalls starke zentrische Belastung aufweisen und nur ganz geringe Biegung haben. Im anderen Falle gibt das Verfahren der elastischen Knotenbleche gute Näherungswerte, wie aus Fig. 74 hervorgeht.

Wie schon bei den Versuchen erwähnt wurde, ist die Verteilung der Normalspannungen in senkrechten Schnitten durch die Knotenbleche nicht geradlinig, und so zeigen sich in den Fig. 73 bis 75 zwischen den theoretischen und gemessenen Werten oft große Abweichungen, wobei besonders die Spannungssteigerungen an den Lochrändern hervortreten. Unterschiede zeigen sich auch im ungleichen Arbeiten der zusammengenieteten Konstruktionsteile, indem z. B. die Gurtwinkel vielfach weniger tragen, als ihnen durch den geradlinigen Spannungsverlauf zukommt. Diese Erscheinung tritt besonders stark in Fig. 73 hervor, wo der Hauptanteil dem Kotenblech zugeschoben ist. Auch hier spielt die Nachgiebigkeit der Niete ihre Rolle. Es muß zwar betont werden, daß dieser Zustand ein Ausnahmefall infolge der großen Pfostenlast ist, so daß besser aus Belastungsfall 2 allgemeine Schlüsse gezogen werden sollten. Allerdings ist nicht zu verkennen, daß die Auflagerpunkte von Bauwerken ähnliche Verhältnisse aufweisen, wie vorgehend erwähnt wurde.

Die Schubspannungen im Knotenblech 4 *A*, Fig. 73 und Fig. 74, weichen nach dem Näherungsverfahren berechnet, wenig von den Meßwerten ab, sofern nicht Nietlöcher im betreffenden Schnitt sind. Näherungsweise wird man auch dort, wie z. B. bei Schnitt F_a bei der theoretischen Berechnung die Verteilung am besten als parabelförmig annehmen unter Freilassung der Nietlöcher. Ist der eine Knotenblechrand zum Vertikalschnitt geneigt, so nehmen die Schubspannungen am Randpunkt endliche Werte an, Fig. 75; oft treten noch in solchen Schnitten Schubspannungen mit verschiedenen Vorzeichen auf, Fig. 75 und 61. In solchen Fällen ist eine rechnerische Erfassung kaum möglich, es könnte dies höchstens durch die Trajektorienbilder erfolgen.

Ebenso schwierig ist die Bestimmung der Schubspannungen an Gurtwinkeln.

Die größten Hauptspannungen treten am Knotenpunkt im Knotenblech oder in den äußeren Fasern der Gurtlamellen auf. Als grundsätzlicher Gegensatz zwischen Wirklichkeit und Theorie, bei der ebenbleibende Querschnitte angenommen werden, ergibt sich, daß an den Knotenblechen mit Diagonalanschlüssen sehr oft der Fall eintritt, daß für lotrechte Schnitte die größten Normal- und Schubspannungen in der Mittelzone zusammenfallen und demnach dort die größten Hauptspannungen vorkommen können. Siehe Schnitt *F* Fig. 73 und Schnitt *G* Fig. 74. Infolge der zweiachsigen Spannungszustände muß die Hauptspannung aus der Gleichung (26) bestimmt werden:

$$\sigma_{\substack{max \\ min}} = 0{,}5\,(\sigma_\alpha + \sigma_{\alpha+\pi/2}) \pm 0{,}5\,\sqrt{(\sigma_\alpha - \sigma_{\alpha+\pi/2})^2 + 4\,\tau_\alpha^2}\ . \quad . \quad . \quad (26)$$

oder, wenn zur Dimensionierung die Dehnung maßgebend sein soll,

$$\sigma_{\substack{max \\ min}} = 0{,}35\,(\sigma_\alpha + \sigma_{\alpha+\pi/2}) \pm 0{,}65\,\sqrt{(\sigma_\alpha - \sigma_{\alpha+\pi/2})^2 + 4\,\tau_\alpha^2} \quad . \quad . \quad (27).$$

Die Formel (26) wurde auch zur Bestimmung der Hauptspannungen aus den Messungen verwendet, nur in veränderter Form. Bei der theoretischen Berechnung der Hauptspannungen wird für σ_{max} das $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ immer vernachlässigt, weil es beim einfachen Balken nahezu null ist und in der Praxis bei ähnlichen Problemen immer auf diesen Fall zurückgegriffen wird. Wie jedoch aus den gezeichneten Spannungsverteilungen für die verschiedenen Knotenblechtypen hervorgeht, sind die Normalspannungen in wagerechten Schnitten an den wenigsten Stellen null, da ja gerade die Knotenbleche von verschiedenen Richtungen aus gespannt werden. Es übt jedoch das $\sigma_{\alpha+\pi/2}$, wenn es klein ist, keinen großen Einfluß auf das σ_{max} aus, da seine Wirkung infolge der ungleichen Vorzeichen, mit denen es in den zwei Gliedern behaftet ist, zum Teil aufgehoben wird. Man kann so in vielen Fällen auch bei Knotenblechen ohne dessen Kenntnis gute Ergebnisse erhalten.

Wenn wir kurz auf die Normalspannungen in wagerechten Schnitten eingehen wollen, so kann von ihnen gesagt werden, daß sie sich völlig den lokalen Einwirkungen der Füllungsglieder anpassen. Beim Knotenblech 4 *A*, Fig. 24, macht sich die Zugwirkung der Diagonale dadurch geltend, daß die Spannungslinie im Schnitt *U* bis zu einem Höchstwert von + 284 kg/cm² emporsteigt, gegen den Pfosten zu abfällt und dort negative Werte annimmt. Es entsteht so eine Wellenlinie, deren Spannungsfläche gleich ist der Normalkomponente der am einen oder anderen abgeschnittenen Teil wirkenden äußeren Kräfte. Es können auch örtliche Stücke dieser Spannungsfläche bestimmt werden, wenn die Schubkräfte in senkrechten Schnitten zu Hilfe gezogen werden, ähnlich wie es bei Knotenblech 3 *A* Belastungsfall 1 getan worden ist. Für tiefer liegende wagerechte Schnitte flachen sich deren Normalspannungskurven ab.

Aenliche Verhältnisse zeigen sich bei 4 A, Belastungsfall 2, Fig. 31. Wieder entsteht im Schnitt U eine Druckwelle infolge der Druckdiagonale und eine Zugwelle unter der Zugdiagonale. In tiefer liegenden Schnitten flachen sich die Kurven ebenfalls ab.

Beim Knotenblech 3 A, Fig. 47, macht sich die Druckwelle infolge der Wirkung des Pfostens in ausgeprägtem Maße geltend, deren größte Ordinaten über den Pfostenanschlußnieten auftreten.

Von den in Tafel 16 untersuchten Vertikalschnitten kommen nur bei den Schnitten F_a, Fig. 73, G, Fig. 74 und g, Fig. 75, die Spannungen $\sigma_{\alpha + \pi/2}$ in Betracht, die anderen fallen in Zonen, wo die $\sigma_{\alpha + \pi/2}$ ganz untergeordnete Werte annehmen.

Wie aus dem Vergleich der angeführten gemessenen und berechneten Spannungsverteilungen hervorgeht, ist es möglich, die Knotenbleche so auszubilden, daß der Sicherheitsgrad dieser Konstruktionsteile demjenigen des gesamten Bauwerkes entspricht, und daß, abgesehen von örtlichen Ueberbeanspruchungen an Lochrändern, durch die richtige Anwendung theoretischer Berechnungsverfahren ziemlich nahe an die wirklichen Spannungszustände heranzukommen ist. Es soll im folgenden Abschnitt versucht werden, die Meßergebnisse bei den Knotenblechen in rechnerischer und konstruktiver Hinsicht zu verwerten, wobei jedoch infolge der Fülle der Ergebnisse nur auf einige Hauptpunkte eingegangen werden kann.

VII. Praktische Folgerungen aus den vorgehenden Versuchen.

1. Allgemeine Gesichtspunkte beim Entwurf der Knotenbleche.

Im allgemeinen dienen die Knotenbleche zur Verbindung der Füllungsglieder mit der Gurtung des Fachwerkes, wobei sie zugleich auch ein Teil der Gurtung selbst sein, bezw. zur Gurtlaschung herangezogen werden können. Es kann sich so handeln um Knotenbleche, die entweder äußere Kräfte unmittelbar auf Stäbe übertragen, oder um solche, die den Zweck haben, Kräfte aus dem einen Gurtstab überzuleiten, einerseits auf die Füllungsglieder und andererseits bei entsprechender Konstruktion auf den folgenden Gurtstab. Zur Veranschaulichung des Kräfteverlaufes dienen vor allem die Trajektorienbilder, die unter Berücksichtigung der Veränderungen durch die verschiedenen Belastungsfälle als Grundlage für den Entwurf der Knotenbleche bezeichnet werden können. Zur Darstellung der Kraftfelder in Knotenblechen ist es notwendig, daß Bauart, Stabkräfte, Stabquerschnitte, Anschlüsse und womöglich auch die Nebenspannungsmomente für verschiedene Belastungsfälle bekannt sind. Durch die in vorgehenden Untersuchungen an einigen Knotenblechbauarten bei verschiedenen Belastungszuständen ermittelten Kraftfelder ist die Möglichkeit gegeben, diese Ergebnisse ohne Schwierigkeiten auf andere Formen und Belastungszustände anzuwenden. Wenn vorherrschend Zugkräfte am Knotenblech angreifen, sucht man am einfachsten die seilförmigen Zugtrajektorien zu bestimmen, die von den Anschlußnieten des Stabes mit der größten Zugkraft nach denen der übrigen Zugstäbe ausgehen. Die vom Druckstab ausgehenden Drucktrajektorien bilden dann gewissermaßen die Unterlage für die gekrümmten Seilzuglinien, wie z. B. aus Fig. 57 Tafel 13 deutlich hervorgeht. Bei Knotenblechen mit vorherrschend gedrückten Anschlußstäben sucht man hingegen diejenigen Drucklinienstränge zu bestimmen, die vom Stab mit der größten Druckkraft aus zu den übrigen Druckstäben verlaufen, wobei als Ausgangspunkte immer die Anschlußniete zu betrachten sind. Diese Drucktrajektorien werden dann senkrecht geschnitten von

den Zughauptlinien, die ihren Ursprung im Anschluß des angreifenden Zugstabes haben. Je nach der Anordnung der Stäbe und ihrer Kraftgröße können die verschiedensten Variationen in den Kraftfeldern entstehen, auf die nicht weiter eingegangen werden soll.

Die Hauptsache ist nun, daß diese erwähnten Kraftstränge, die sich bei den verschiedenen Belastungsfällen völlig verändern können, den natürlichen, richtigen Verlauf nehmen, so daß das Knotenblech seinen Zweck voll erfüllt. Ist das Knotenblech seitlich an die durchgehende Gurtung angeschlossen, so hat es vorherrschend die Aufgabe, einen Teil der im Gurtstab verlaufenden Kraftlinien aufzunehmen und auf die Füllungsglieder zu übertragen; als Teil der Gurtung spielt es eine untergeordnete Rolle. Ist es hingegen in die Gurtung eingefügt, oder dient es als Gurtlasche, so hat es außer der erwähnten Aufgabe in vermehrtem Maße den Funktionen als Teil der Gurtung gerecht zu werden. In jedem Falle nehmen die beiden Aufgaben zu ihrer Erfüllung je nach dem Verhältnis der Gurtkräfte zu den Kräften der Füllungsglieder und je nach der Verbindungsart des Knotenbleches mit der Gurtung einen bestimmten Teil des an das Stehblech angeschlossenen Knotenblechteiles oder von dem durch das Knotenblech gebildeten Stehblechstreifen in Anspruch. Der über das Gurtstehblech auskragende Knotenblechteil dient hauptsächlich dazu, den konzentriert angreifenden Anschlußnietkräften der Füllungsglieder eine Verteilungsmöglichkeit zu schaffen, wobei im weiteren noch die Mitwirkung an der Aufnahme der Scherkräfte und an der Versteifung der Gurtung bei großen Pfostenkräften von Vorteil ist. Alle diese Vergünstigungen fallen beim unmittelbaren Anschluß der Füllungsglieder an das Gurtstehblech weg, so daß von diesem infolge der Uebernahme der erwähnten Funktionen ein bedeutender Teil dem ursprünglichen Zweck entzogen wird.

Der Abbau oder Anbau der Gurtkräfte durch die Füllungsglieder geschieht an Ort und Stelle, d. h. es werden aus der Gurtung diejenigen Kraftlinien zuerst herausgeholt, die dem Anschluß der Diagonale am nächsten liegen. In den Abbildungen 27 und 28 soll der örtliche Abbau der Gurtkräfte dargestellt werden, so wie er sich aus den Versuchen ergibt. In Abb. 27 wird entsprechend dem in Fig. 30 gekennzeichneten Trajektorienverlauf angegeben, in welcher Weise die Kraft S des Gurtstabes U_{2-4} auf die anderen Stäbe übergeleitet wird. Der oberste Streifen wird durch die Druckdiagonale aufgenommen, der zweite durch die Zugdiagonale, wobei noch ein bedeutender Kraftteil aus den Gurtwinkeln und der Lamelle herausgezogen wird; der dritte Streifen, der allein aus den Gurtwinkeln und der Lamelle stammt, verteilt sich nachher vollständig auf den ganzen Querschnitt des Stabes U_{4-6}. Aus dieser Figur ist auch ersichtlich, welche Kräfte durch den Schnitt $O-O$ hindurchgehen, falls das Knotenblech zur Laschung des Gurtstehbleches herangezogen werden sollte. Wie aus allen Versuchen hervorgeht, nimmt der über das Gurtstehblech auskragende Knotenblechteil sehr wenig von den Normalspannungen im Schnitt $O-O$ auf, so daß dieser Teil für die Verlaschung nicht in Betracht kommt. In Abb. 28 wird gezeigt, wie beim Pfostenfachwerk die Gurtkraft S sich zerteilt in die Stabkräfte S' und D, wobei auch hier das Knotenblech einen Teil der aus den Gurtwinkeln und der Lamelle stammenden Kraft auf das Stehblech des Stabes U_{4-6} zu übertragen hat. Im Schnitt $O-O$ tritt die ganze Gurtkraft des Stabes U_{2-4} auf, worauf bei der Laschung zu achten ist. Bezüglich des über das Gurtstehblech auskragenden Knotenblechteiles gelten bei der Laschung die vorgehenden Bemerkungen. Ist der Gurtstab U_{2-4} durch eine Lamelle verstärkt, so

ergibt sich aus den erwähnten Figuren, daß sie über den Punkt 4 hinausreichen muß, damit ein allmählicher Uebergang der Kräfte in dieselbe stattfinden kann.

Eine ganz besondere Wirkung üben die großen Pfostenkräfte auf die Knotenbleche aus, wie aus Abb. 29 hervorgeht. In diesem Falle drängt der die beiden Diagonalen verbindende Kraftstrang denjenigen der Gurtung aus dem Knotenblech heraus in die Gurtwinkel und Lamelle, so daß dort örtliche Ueberbeanspruchungen vorkommen. In solchen Fällen ist es notwendig, daß man infolge der sekundären Biegungswirkung des Pfostens die Gurtung durch eine weitere Lamelle örtlich verstärkt oder beim in die Gurtung eingefügten Knotenblech die Stehblechlaschen völlig über das Knotenblech durchführt und so den Gurtkraftlinien ungehinderten Durchfluß verschafft. Wird das Knotenblech zur

Schematische Darstellung des Kraftabbaues an den Gurtstäben.

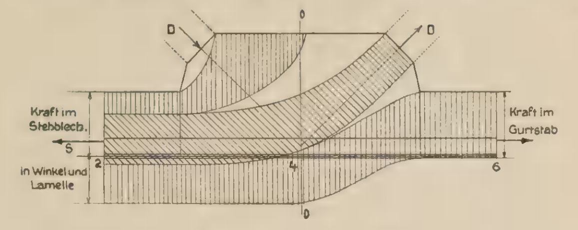


Abb. 27. Knotenblech 4 *A*. Bel. Fall 2.

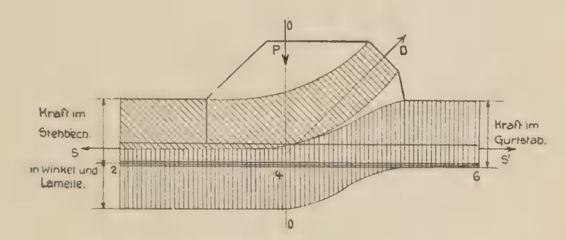


Abb. 28. Knotenblech 4 *B*. Bel. Fall 1.

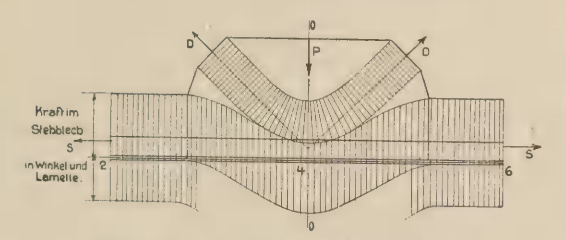


Abb. 29. Knotenblech 4 *A*. Bel. Fall 1.

Laschung des Gurtstehbleches herangezogen, so muß im Schnitt $O-O$ außer der Gurtkraft S auch noch die wagerechte Komponente der Diagonalkraft gedeckt werden. Im weiteren ist es notwendig, die Wirkung der durch Pfosten und Diagonalkräfte entstehenden Scherkräfte zu untersuchen.

Aus diesen Ausführungen geht hervor, daß das Knotenblech möglichst an alle Teile des Gurtstabes angeschlossen werden soll, damit die Kraftabgabe an dieses aus allen diesen Teilen unmittelbar erfolgen kann. In dieser Hinsicht ist das Einfügen der Knotenbleche in die Gurtung als gute Lösung zu betrachten. Noch besser ist es, wenn bei mehreren Gurtlamellen das Knotenblech durch diese dringt und sie durch besondere Winkel angeschlossen werden.

Werden die Knotenbleche nur mit dem durchgehenden Gurtstehblech vernietet, so ist bei großen Diagonalkräften unbedingt erforderlich, daß jene von den Gurtwinkeln gefaßt werden, damit die aus den Gurtwinkeln und Lamellen abwandernden Kräfte dies unmittelbar tun können. Zugleich rückt in diesem Falle die Schwerlinie der Anschlußniete des Knotenbleches nahe an diejenige der Gurtung heran, wodurch sehr störende Nebenspannungen vermindert oder vermieden werden können.

Es soll bei dieser Gelegenheit noch auf das Arbeiten der Knotenblechanschlüsse an die Gurtstehbleche des Probeträgers aufmerksam gemacht werden. Infolge der gedrängten Ausbildung des Probeträgers war es nicht möglich, die Winkel der Gurtungen zu stoßen, um dadurch die Gurtstehbleche auf ihrer ganzen Breite mit dem Knotenblech verlaschen zu können. Trotzdem zeigt sich, daß auch die zwei getrennten Laschen in vielen Fällen gut miteinander arbeiten, wobei besonders das Mitwirken der auf die Winkelschenkel aufgenieteten Laschenstücke vom Querschnitt 70×8 beachtenswert ist. Bei Belastungsfällen, wo Querkräfte aus Nebenspannungen und große Normalkräfte zu übertragen sind, kommt hingegen ihr getrenntes Arbeiten deutlich zum Vorschein. Dies zeigt sich beim Vergleich der Spannungsverteilungen im Schnitt *A* in Fig. 26 und Fig. 35. Der Grund der Verschiedenheit des Arbeitens trotz der ähnlichen Querkräfte scheint in der Ueberwindung der Reibung aus Nietkopfpressung im Belastungsfall 2 zu liegen, wo die große Lasche eine bedeutend stärkere Beanspruchung durch Normalkräfte erfährt, als dies im Belastungsfall 1 der Fall ist. Es ist daher die angewendete Verlaschung bei großen Einspannmomenten nicht als vollwertig zu betrachten.

Wie aus den Abbaufiguren ersichtlich ist, muß in vielen Fällen die Kraft für den nachfolgenden Gurtstab aus den Gurtwinkeln und Lamellen des vorgehenden Gurtstabes genommen werden. Um den Verlauf der Kräfte besser zu gestalten, ist es vorteilhaft, wenn das Material möglichst in den Steg gebracht wird, weil dann der Abfluß der Kräfte aus den Gurtwinkeln und Lamellen nicht in so schroffer Weise erfolgen muß, wie wenn der größte Teil des Materials in diese Teile gesteckt wird.

Die Form des Knotenbleches ist völlig von der Art der Ueberleitung der Kräfte abhängig. In jedem Falle ist sie so zu gestalten, daß unnötige Ansammlungen und Umlenkungen von Kraftlinien möglichst vermieden werden, da schon bei normalem Spannungszustand an den Lochrändern Anhäufungen stattfinden, deren Vergrößerung nicht willkommen ist. Die Kraftverbindungen sollen daher auf möglichst breiter Front und auf dem kürzesten Wege erfolgen. Durch die Untersuchung der Aenderungen der Kraftströme infolge variierender Belastung wird man in den Stand gesetzt, jede Kraftverbindung im Knotenblech ihrer Wichtigkeit entsprechend auszubauen.

Wie wichtig eine richtige Ueberleitung von Kraftlinien ist, soll am Knotenblech 4 *B* gezeigt werden, Fig. 57. Dort wird ein Teil der Stabkraft des Untergurtes U_{2-4} in schönen Seilkurven auf die Diagonale übergeführt, wobei die Pfostenkraft unmittelbar auf diesen Seillinien ruht. Denkt man sich nun das Knotenblech beim Pfosten schon abgeschnitten, wie das vielfach der Fall ist, dann kann die Auflagerung des Pfostens auf den Seillinien nicht mehr in dem Maße erfolgen, wie es beim Knotenblech mit Kragteil der Fall ist. Es werden dafür entsprechende Zusatzbeanspruchungen im Gurtstehblech entstehen, die bei richtiger Ausbildung des Knotenbleches vermieden werden können.

Der auf die Füllungsglieder zufließende Kraftstrom soll nun durch die hintereinander angeordneten Anschlußniete der Stäbe nach und nach auf-

genommen werden. Nach den Versuchsergebnissen können praktisch bei den unmittelbaren Diagonal- und Pfostenanschlüssen alle Niete als gleich tragend angenommen werden. Es zeigt sich z. B., daß bei fünf hintereinander liegenden Nieten der letzte noch gut arbeitet. Die Beanspruchungen der einzelnen Niete ändern sich in gewissen Grenzen infolge der Abmessungen von Knotenblech und Lasche oder Stabquerschnitt, außerdem üben auch die Einspannmomente der Stäbe einen Einfluß aus Die Anordnung der Anschlußniete ist nun so auszubilden, daß der Kraftfluß leicht aufgenommen werden kann. Bei dieser Gelegenheit soll auf die Versuchsergebnisse am Knotenblech im Bereich des Diagonalanschlusses näher eingegangen werden.

Bei Betrachtung des in Fig. 23 dargestellten Zugdiagonalanschlusses zeigt sich, daß alle Seillinien, welche die einzelnen Anschlußniete umfassen, den durch die beiden Nietreihen begrenzten Knotenblechteil durchlaufen. Es muß demnach, wenn keine Zwischenniete vorhanden sind, bei der Zugdiagonale die Summe der Normalspannungen im Schnitt o — o in Abb. 30 zwischen den beiden letzten Anschlußnieten gleich $\frac{D}{2}$ sein. Nach diesen Annahmen würde sich folgender Nietreihenabstand a in cm ergeben, wenn man bezeichnet mit

s die Dicke des Knotenbleches in cm,
d den Nietdurchmesser in cm,
n die Nietzahl in einer Reihe,
σ_l den Lochleibungsdruck in t/cm²,
σ_z die Zugspannung in t/cm².

Für den letzten Schnitt o — o

$$(a - d)\, s\, \sigma_z = n\, s\, d\, \sigma_l$$

$$a = \frac{d\,(n\,\sigma_l + \sigma_z)}{\sigma_z},$$

für den Fall

$$\sigma_l = \sigma_z$$

wird der Nietreihenabstand senkrecht zur Kraftrichtung

$$a = d\,(n + 1).$$

Es müßte demnach der Nietreihenabstand mit der Größe der Nietdurchmesser und der Nietzahl in einer Reihe zunehmen, um diesen Bedingungen genügen zu können. Da man im allgemeinen den Nietreihenabstand nicht größer als 3—4 d macht, so würden schon nach dem dritten Anschlußniet Ueberbeanspruchungen eintreten, die ein seitliches Abwandern der Kraftlinien nach Abb. 31 bewirken. Hieraus folgt, daß je nach den Abmessungen von a, b, d und der Knotenblechform sowie entsprechend der Zahl der Niete in einer Anschlußreihe die Kraftlinien in mehr oder weniger starkem Maße ihren unbehinderten bzw. abgelenkten Weg einschlagen. Ganz ähnlich sind die Verhältnisse, wenn mehrere Nietreihen vorhanden sind, oder bei Zwischennieten, Abb. 32. Es ist ohne weiteres klar, daß derjenige Stabanschluß der beste ist, bei dem die Kraftlinien am wenigsten umgelenkt werden, d. h. es sollte der Nietreihenabstand a derart bemessen werden, daß der Kraftverlauf sich möglichst nach Abb. 30 gestaltet. Dies ist dann um so eher der Fall, je breiter der Stabanschluß gemacht wird und je weniger Anschlußniete in einer Reihe sind. Hierzu tragen in besonderem Maße die seitlichen Anschlußwinkel bei, es müssen jedoch die einzelnen Winkelschenkel mit wenigstens je 3 Nieten angeschlossen werden, um den Anschluß wirksam zu machen, da die elastische Verformung der Nietschäfte entsprechend zu berücksichtigen ist. Aus diesem Grunde zeigt sich auch beim Knotenblech 4 A' ihre geringe Wirksamkeit. Die

Anschlußwinkel sollten auch möglichst gegen den Rand des Knotenblechs zu gerückt werden, damit sie an die stark beanspruchten Schenkel der Füllungsglieder anschließen. Ihre Anordnung muß unbedingt symmetrisch zur Stabachse sein, weil sonst unnötige Störungen im Kraftfeld eintreten.

Der am Ende des Diagonalanschlusses angebrachte Zwischenniet bewirkt eine Ablenkung der sonst gerade verlaufenden Kraftlinien und es werden sich an dessen Lochrändern starke Ansammlungen zeigen. Wird ein solcher Zwischenniet, der nach den Versuchen noch sehr gut arbeitet, durch die Konstruktion bedingt, so kann sein störender Einfluß dadurch gemildert werden, daß er nicht zu nahe an die vorgehenden Niete herangerückt wird. Die zwischen den Nietreihen verlaufenden Kraftlinien erhalten dadurch die Möglichkeit, sich besser dem neuen Störungsfaktor anzupassen.

Schematische Darstellung des Kraftlinienverlaufes in Anschlußteilen des Knotenbleches für Zugdiagonalen.

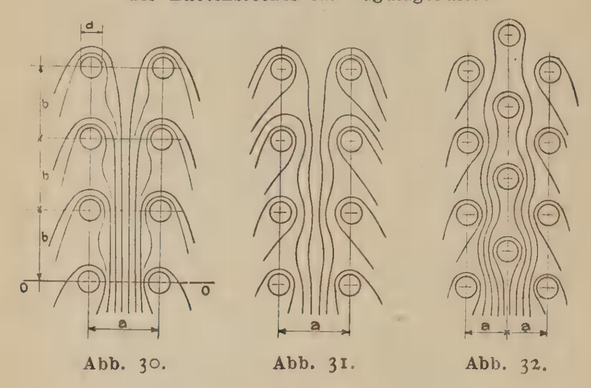


Abb. 30. Abb. 31. Abb. 32.

Allgemein kann nach vorgehenden Untersuchungen gesagt werden, daß die größte Sorgfalt auf den richtigen Anschluß der Füllungsglieder zu legen ist, weil infolge der vielen nahe beieinander angreifenden Nietkräfte im Knotenblech, wie in den Fachwerkstäben bedeutende Ueberbeanspruchungen auftreten können.[1] Grundsätzlich sind die Anschlußniete gleichmäßig über den anzuschließenden Teil zu verteilen.

Entsprechend der allmählichen Abnahme der Kraft im Anschlußteil des Knotenbleches können seine Abmessungen verringert werden. Die Knotenblechränder sollen möglichst symmetrisch auf die Stabachse zulaufen. Wie aus den Vorversuchen am Probekörper hervorgeht, kann bis zu einer Neigung der Ränder von etwa 30° zur Stabachse, abgesehen von der Zone der Anschlußnieten, eine fast gleichmäßige Spannungsverteilung über den senkrecht zur Achse gelegten Querschnitt angenommen werden; bei größeren Neigungen nimmt die Spannung gegen den Rand zu ab. Solche Teile bilden jedoch eine gute Reserve und es ist schädlich, in solchen Fällen die Knotenblechränder geschweift zu machen, da durch die hieraus entstehenden vorspringenden Ecken ein Teil der Kraftlinien von ihrem natürlichen Lauf abgeleitet wird und da auf die Ueberbeanspruchungen in der Zone der Anschlußniete unbedingt Rücksicht genommen werden muß. Auf die Wichtigkeit des über das Gurtstehblech hinauskragenden Knotenblechteiles wurde bereits hingewiesen.

---

[1] Die Versuche von Rudeloff in Heft Nr. 3 der Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau zeigen in den dortigen Fig. 88 und 89 darauf hin, daß die Ansammlung von Kraftlinien zwischen den Nietreihen auch die Ursache des Bruches der Knotenbleche geworden ist

Bei Knotenblechen, die unmittelbar angreifende Kräfte auf einen Einzelstab zu übertragen haben, wie dies bei Auflagerpunkten und Pfostenstäben der Fall ist, soll getrachtet werden, daß eine Uebertragung der Kraft möglichst unmittelbar auf Knotenblech und Pfosten erfolgt. Eine sorgfältige Einpassung von Pfosten und Knotenblech ist unerläßlich, weil sonst die Halsniete der Gurtwinkel starke Ueberbeanspruchungen erfahren. Dies geht besonders aus den Versuchen am Knotenpunkt 3 *A* Belastungsfall 1 hervor, wo infolge ungenauer Einpassung der Pfostenwinkel, die Gurtwinkel eine wesentliche sekundäre Biegung erhalten. Diese Sekundärspannungen würden zum Teil auch trotz des gut anliegenden Knotenbleches entstehen, wenn die Profileisen des Pfostens nicht gut eingepaßt sind, da das Knotenblech sich infolge der Elastizität der Pfostenanschlußniete so weit senkt, bis der Pfosten direkt belastet wird. Kommen nicht besondere Zusatzbeanspruchungen des Knotenbleches durch die Gurtungen vor, so gehen die Druckkraftstränge vom belasteten Knotenblechrand aus in geordneter Form auf die Pfostenanschlußniete zu, wobei die äußersten Kraftlinien den entferntesten Pfostenanschlußnieten zuströmen. Ist das Knotenblech in die Gurtung eingefügt, so hat es auch noch deren Funktionen auszuführen. In diesem Falle sind die hohen Knotenbleche nicht von Vorteil, weil die Abweichung der Schwerlinie des Knotenblechpunktes von der Systemachse bedeutende Nebenspannungsmomente erzeugt. Auch die vermehrte Nietzahl beim Pfosten des Knotenpunktes 3 *A'* kommt nicht voll zur Geltung, weil das höhere Blech an Steifigkeit für Druckübertragung verliert. Das Knotenblech 3 *A* Belastungsfall 1 zeigt, daß bei scheinbar einfachem Belastungszustand oft recht verwickelte Kraftfelder entstehen können, die nur unter Mithilfe der Rechnung gelöst werden können.

Neben den unmittelbar auf das Knotenblech wirkenden Stabkräften kommen noch andere Einflüsse hinzu, die im Kraftfeld Veränderungen hervorrufen; hiervon sind die aus den Einspannmomenten der Stäbe und aus exzentrischen Anschlüssen entstehenden Nebenspannungen zu nennen, ferner das seitliche Ausweichen des Knotenbleches infolge Bearbeitungs- und Montageungenauigkeiten und infolge einschnittiger Stabanschlüsse, wie dies meist bei doppelwandigen Konstruktionen der Fall ist, und im weiteren das Abweichen der Knotenpunktsschwerlinie von der Zentrierachse. Die Nebenspannungen können wohl vermindert, nicht aber beseitigt werden. Besonders die Exzentrizitäten spielen eine große Rolle, die möglichst zu vermeiden gesucht werden sollen. Ebenso sind zu große Knotenbleche nicht von Vorteil, indem die Versteifungsstrecken und damit die Einspannungsmomente vergrößert werden; auch dieser Umstand weist auf kleinere, aber stärkere Knotenbleche hin. Die einseitigen Anschlüsse erzeugen recht ungünstige örtliche Spannungsverteilungen im Stab wie im Knotenblech, worauf schon früher bei der Nietdeformation hingewiesen worden ist. Es sollte daher bei zweiwandigen Tragwerken danach getrachtet werden, möglichst jede Tragwand für sich symmetrisch auszubilden und die Füllungsglieder zweischnittig anzuschließen, wodurch auch eine Verringerung der Knotenblechfläche möglich wird. Die Füllungsglieder sind, soweit der Anschluß am Knotenblech reicht, vollwandig auszuführen, damit die seitlichen Momente sich gegenseitig aufheben. Es ist nicht notwendig, daß die Knotenpunktschwerlinie bei Diagonalanschlüssen mit der Systemlinie der Gurtung zusammenfällt, da trotzdem infolge der Diagonalkraft Biegungsmomente entstehen, wie aus den Fig. 28 und 38 zu ersehen ist. Am zweckmäßigsten würde in solchen Fällen die Schwerlinie dann liegen, wenn die größten negativen und positiven Mo-

mente M_s gleich groß sind. Die Lage der Knotenpunktschwerlinie kann geregelt werden, indem ein Lamellenstück an die Gurtlamellen angebracht oder die Gurtlamellen geschlitzt und das Knotenblech durchgeführt wird. Bei zweiwandigen Querschnitten kann außer den vorgebrachten Maßnahmen noch das Halten der Knotenbleche durch innere Gurtwinkel, sofern nicht schon solche im Gurtquerschnitt vorhanden sind, zum Ziel führen. Zur Versteifung der Knotenbleche ist ein möglichst tiefes Hineinführen der Füllungsglieder von Nutzen. Den seitlichen Einflüssen kann außerdem durch möglichst starke Knotenbleche begegnet werden.

Sind die Nebenspannungsmomente bekannt, so ist man in der Lage, die Randspannungen am Knotenblech näher zu bestimmen und das Kraftfeld für einen bestimmten Belastungszustand zu vervollständigen, weil diejenigen Kraftlinien den Rändern entlang gehen, deren Vorzeichen mit denen der Randspannungen übereinstimmen.

Von großer Wichtigkeit ist die Bestimmung des gefährlichsten Belastungsfalles unter Berücksichtigung der Nebenspannungsmomente für ein beliebiges Knotenblechelement, um hieraus dann die am meisten bedrohten Stellen des Knotenbleches genau feststellen zu können. Diese Aufgabe ist heute noch nicht einwandfrei zu lösen, und es ist aus diesem Grunde bei der Wahl der zulässigen Spannungen Vorsicht geboten.

2. Rechnerische Grundlagen[1]).

a) Allgemeines.

Es soll im folgenden versucht werden, mit Hilfe der ermittelten Kraftfelder und Spannungsverteilungen an den Versuchskörpern die Größen der Hauptspannungen theoretisch zu berechnen. Wie bei früheren Bemerkungen schon erwähnt wurde, kann es sich dabei nur um Näherungswerte handeln, man wird jedoch trotzdem in die Lage kommen, sich ein klares Bild über die Spannungsverteilungen und über die Größen der Spannungen im Knotenblech machen zu können. Es muß betont werden, daß bei den Dimensionierungsformeln auf die Steigerung der Spannungen an den Lochrändern keine Rücksicht genommen wird, da sich nach der Ueberschreitung der Elastizitätsgrenze infolge der veränderten Dehnungsverhältnisse eine stärkere Beteiligung der weniger beanspruchten Teile an der Kraftaufnahme ergibt und infolgedessen eine günstigere Spannungsverteilung eintritt. Die Herabminderung des Sicherheitsgrades tritt daher bei zunehmender Belastung nicht in dem Maße zu Tage, wie die erwähnte Steigerung der Spannungen an den Lochrändern vermuten ließe. Diese Annahme beruht auf den in Kap. III Abschnitt 4 d gemachten Erwägungen, und es ist von größter Notwendigkeit, durch eingehende Untersuchungen diese Frage völlig zu klären. Solange das Material nur gezogen oder nur gedrückt wird, liegt die Ermüdungsfestigkeit, d. h. die Festigkeit bei Dauerbeanspruchung, über der Streckgrenze (bei Flußeisen etwa bei 2600 kg/cm^2). Diese Festigkeit kommt für die Bemessung der Bauteile praktisch in Betracht, da nach einmaliger Beanspruchung des Materials bis zu dieser Grenze, dieses völlig elastisch arbeitet und die Spannungen verhältnisgleich den Dehnungen sind. Bei abwechselnder Zug- und Druckbelastung sinkt die Ermüdungsfestigkeit

---

[1]) Schon 1918 machte das Brückenbureau der Generaldirektion der schweiz. Bundesbahnen unter Leitung von Herrn Brückeningenieur Bühler im Bestreben der Aufklärung der Spannungsverhältnisse an Knotenblechen Versuche an bestehenden Brücken zur Nachprüfung seiner verwendeten Berechnungsformeln.

unter die Streckgrenze, worauf bei der Wahl der Abmessungen zu achten ist; die Dehnungen sind auch hier nach einmaliger Beanspruchung vollkommen elastisch und verhältnisgleich den Spannungen. Durch die Spannungsbilder in den Knotenblechen aus verschiedenen Belastungszuständen ist leicht zu ersehen, welche Teile entsprechend den obigen Angaben einer Ermüdung des Materials ausgesetzt und danach zu bemessen sind. Es ist auch bei der Bemessung der Knotenbleche vorherrschend auf diejenigen Teile zu achten, bei denen bei Ueberbeanspruchungen die Kraftlinien nicht oder nur in beschränktem Maße in weniger beanspruchte Zonen abwandern können.

b) Bestimmung der Hauptspannungen aus den Trajektorien.

Die Trajektorienfelder geben einerseits die Richtungen der Hauptspannungen an, anderseits kann aus der gegenseitigen Lage entsprechender Kraftlinien auf die Veränderlichkeit der vorkommenden Hauptspannungen längs der Normalschnitte dazu geschlossen werden. Die Größe der Spannungen selbst ergibt sich erst aus der Größe der das Kraftfeld erzeugenden Kräfte. Zur Ermittlung der größten Hauptspannnungen für einen bestimmten Belastungsfall könnte man so vorgehen, daß der Schnitt durch das Knotenblech längs einer Minimal- oder Maximaltrajektorie gelegt wird. Es müssen dann die äußeren, am abgeschnittenen Knotenblechteil wirkenden Kräfte und Momente mit den sämtlichen Hauptspannungen in diesem Schnitt im Gleichgewicht sein. Da es jedoch meist schwierig ist, die Trajektorien und die Veränderlichkeit der Hauptspannungen mathematisch zu erfassen, so kann dieser Weg nicht zu einem allgemeinen praktischen Berechnungsverfahren führen. Dies ist um so mehr der Fall bei veränderlicher Belastung, weil dann die Hauptspannungskurven sich ändern.

Als das einfachste praktische Berechnungsverfahren ist das bisher übliche mit ebenen Schnitten zu betrachten, für welche durch die vorgehenden Versuche die Verteilung der Normal- und Schubspannungen ermittelt worden sind. Im allgemeinen lassen sich diese Verteilungsgesetze näherungsweise durch die Spannungsverteilung in ebenbleibenden Querschnitten ersetzen, so daß es möglich ist, die Größe der Hauptspannungen über den ganzen Querschnitt zu bestimmen. Oft kommt hierbei auch die genaue oder angenäherte Kenntnis der Neigung der Trajektorien zum Schnitt zustatten, wie sich aus folgendem ergibt.

Nach den früheren Bezeichnungen ist, wenn α der Winkel ist, den die Normalspannung des Schnittes mit der Hauptspannung bildet,

$$\operatorname{tg} 2\,\alpha = \frac{2\,\tau\alpha}{\sigma_\alpha - \sigma_{\alpha+\pi/2}}.$$

Werden die Spannungen σ_α, τ_α und der Winkel α als bekannt vorausgesetzt, so folgt

$$\sigma_{\alpha+\pi/2} = \frac{\sigma_\alpha \operatorname{tg} 2\alpha - 2\,\tau\alpha}{\operatorname{tg} 2\,\alpha},$$

woraus dann nach Formel (26) die Größe der Hauptspannung berechnet werden kann. Vielfach treten Vereinfachungen ein, indem die $\sigma_{\pi/2}$ oder $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ zu null werden, oder so klein sind, daß eine Vernachlässigung gestattet ist. Es soll im folgenden auf die Berechnung der Spannungszustände an einigen Knotenblechtypen eingegangen werden, wobei es sich einerseits darum handelt, den allgemeinen angenäherten Spannungsverlauf für verschiedene Schnitte festzustellen und andererseits für die Dimensionierung die Grenzwerte der Spannungen für den ungünstigsten Belastungszustand unter Berücksichtigung der Nebenspannungen zu bestimmen.

3. Anwendungen.

a) Knotenblech nach Bauart der Vorversuche.

Aus den Vorversuchen ergibt sich der in Abb. 33 gezeichnete Trajektorienverlauf und es kann ferner eine gleichmäßige Spannungsverteilung über die Schnitte senkrecht zur Kraftachse angenommen werden. Im weiteren zeigen

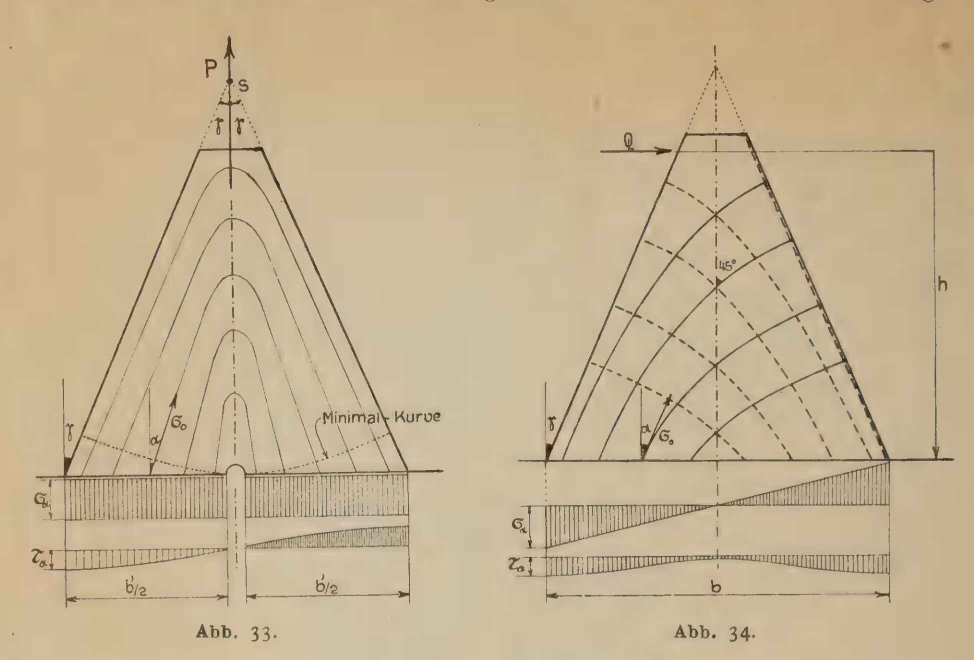


Abb. 33. Abb. 34.

die Messungen, daß die Kleinstwerte der Hauptspannungen $\sigma_{\pi/2}$ klein sind und daher vernachlässigt werden können. In diesem Falle ist bei bekanntem σ_α

$$\sigma_0 = \frac{\sigma\alpha}{\cos^2\alpha} = \frac{P}{F_{\text{net}}}\,\frac{1}{\cos^2\alpha}$$

$$\tau\alpha = \sigma_\alpha \operatorname{tg}\alpha = \frac{P}{F_{\text{net}}}\operatorname{tg}\alpha.$$

Der Winkel α variiert zwischen den Grenzwerten $\pm\gamma$, und es werden σ_0 und τ_α maximal an den Knotenblechrändern und minimal bezw. null in der Mittelachse. Die gleichmäßige Spannungsverteilung von σ_α wurde bei einem Neigungswinkel $\gamma = 20^0$ festgestellt; bis zu welchem Neigungswinkel dieser Zustand bleibt, muß durch weitere Versuche festgestellt werden, indem aus den Hauptversuchen infolge der wirkenden Einspannmomente der Stäbe ein solcher nicht einwandfrei festgestellt werden kann. Als Grenzwert ist näherungsweise 30^0 anzunehmen. Bei größeren Neigungen nehmen die Normalspannungen gegen die Ränder zu ab, und die obigen Formeln verlieren ihre Gültigkeit.

Wird $\sigma_{0\,\max} = \sigma_{\text{zul}}$ gesetzt und mit d die Stärke des Knotenbleches bezeichnet, so ergibt sich die Knotenblechbreite

$$b' = \frac{P}{d\,\sigma_{\text{zul}}\cos^2\gamma}, \quad \text{wo } \gamma < 30^0.$$

Diese Formel besitzt gegenüber der allgemein üblichen den Koeffizienten $\frac{1}{\cos^2\gamma}$. Wird $\gamma = 30^0$ als Grenzwinkel angenommen, so wird $\sigma_0 = 1{,}33\,\sigma_\alpha$.

Bei der Belastung des Knotenbleches durch ein Einspannmoment aus endlich großer Querkraft entstehen die in Abb. 34 gezeichneten Trajektorien. Ihr Verlauf

ist ähnlich dem eines einfachen, durch äußere Kräfte belasteten Balkens. Infolge Symmetrie schneiden sie die Mittelachse unter 45^0. Daß die richtige Spannungsverteilung für einen wagerechten Schnitt ähnlich der theoretischen ist, geht deutlich aus Fig. 50 hervor, wo der Pfosten stark gebogen ist. Auch hier werden die Spannungen nur bis zu einem gewissen Neigungswinkel des Randes geradlinig verlaufen. Bei größerem Neigungswinkel werden die σ_α gegen die Ränder zu abnehmen. Auch in dieser Hinsicht kann auf die Fig. 50 verwiesen werden.

Für die Randspannungen ist $\sigma_{\pi/2} = 0$, und es wird somit

$$\sigma_0 = \sigma_\alpha \frac{1}{\cos^2 \gamma} = \pm \frac{M}{W} \frac{1}{\cos^2 \gamma}$$

$$\tau_\alpha = \pm \sigma_\alpha \operatorname{tg} \gamma.$$

Der Neigungswinkel α, den die Trajektorien mit den Normalspannungen bilden, ändert sich von $+\gamma$ bis $+45^0$ und von -45^0 bis $-\gamma$. Die Schubspannungen sind alle gleich gerichtet, und ihre Verteilungskurve ist von der Lage der Querkraft und dem Neigungswinkel γ abhängig. Dies geht aus folgender Ableitung für die Schubspannung in der Symmetrieachse hervor.

Dort ist

$$\sigma_{max} = \sigma_{min} = \tau_{max}.$$

Da die Hauptspannungslinien die Mittelachse unter 45^0 schneiden, so liegt die größte Schubspannung in der Symmetrieachse selbst. Aus der Gleichgewichtsbedingung der Spannungen in Abb. 35 geht hervor

$$\tau_{mitte} = \frac{3}{2} \frac{Q}{b^2 d} (b - 2\,h \operatorname{tg} \gamma).$$

Wird hier $\gamma = 0$, so erhalten wir die alte Form; wird jedoch $2\,h \operatorname{tg} \gamma = b$, d. h. ist die Querkraft im Schnittpunkt der Randlinien gelegen, so wird $\tau_{mitte} = 0$, währenddem die Schubspannungen am Rand endliche Werte annehmen.

Beim Vergleich der Abb. 33 und 34 geht hervor, in welchem Maße die Trajektorien sich ändern und wie schwer es ist, diese bei gleichzeitiger Wirkung von Zugkraft und Moment zu kombinieren.

In diesem Belastungsfalle ist die Randspannung bei ebenen Schnitten

$$\sigma_0 = \left(\frac{P}{F_{net}} \pm \frac{M}{W}\right) \frac{1}{\cos^2 \gamma} = \sigma_{max}, \quad \text{wo } \gamma < 30^0.$$

Bei unsymmetrischem Knotenblech kann diese Formel ebenfalls angewendet werden, nur sind die entsprechenden Neigungswinkel einzuführen.

b) Knotenblech nach Type 3 A.

Wir nehmen vorerst an, es wirken nur Kräfte auf die Seitenflächen A und B, wie dies in Abb. 36 dargestellt ist. Das Knotenblech ist als Teil der Gurtung zu betrachten, die einheitlich wirken soll. Die Nietverformung wird demnach vernachlässigt. Im Knotenblech selbst verlaufen die Trajektorien, wie sie in der obigen Figur dargestellt sind, sofern der untere Rand infolge der Biegungsmomente nicht Zugspannungen aufweist. In diesem Falle würden sich im Mittelteil T die Zugtrajektorien schließen und die Drucktrajektorien öffnen und auf den Rand zu laufen. Wie aus Fig. 50 hervorgeht, kann man, ohne große Fehler zu begehen, eine geradlinige Spannungsverteilung für senkrechte Schnitte annehmen, was sich noch um so mehr rechtfertigen läßt, da die größten Abweichungen im Unterteil des Knotenbleches auftreten, der für die Festlegung der Abmessungen nicht in Frage kommt. Es ist in der Abb. 36 entsprechend

den obigen Annahmen für einen senkrechten Schnitt die Verteilung der Normal- und Schubspannung eingezeichnet. Hierbei muß die Schubspannungsfläche null ergeben, wenn keine äußere Querkraft vorkommt. Da nach unserer Annahme am unteren Rand ein ziemlich großes σ_α auftritt, so müssen auch die τ_α entsprechende Werte annehmen. Aus der Querkraftbedingung müssen daher im oberen Teil des Schnittes entgegengesetzte Schubspannungen auftreten, was durch die Messungen bestätigt wird, nur sind die gemessenen Schubspannungen viel geringer, weil die σ^α nach dem unteren Rande zu rascher abfallen, als es

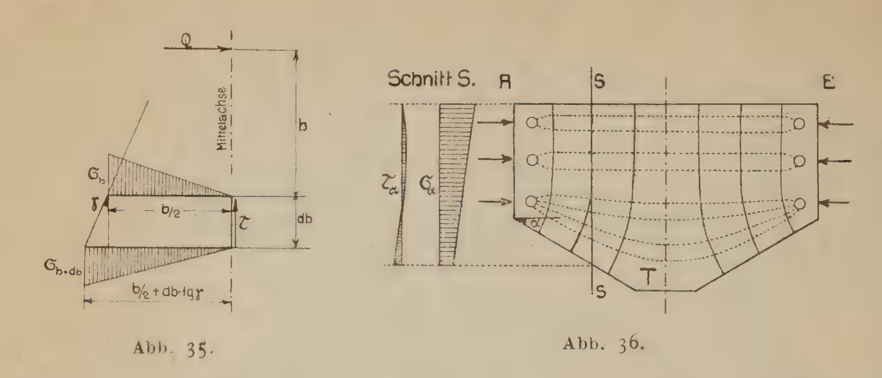


Abb. 35. Abb. 36.

theoretisch der Fall ist. Die Zugtrajektorien weichen so in einzelnen Partien des Oberteiles etwas von den Schnittgeraden ab. Zur angenäherten Bestimmung der Hauptspannungen σ_0 können die $\sigma_{\pi/2}$ gleich null gesetzt werden und die Neigungswinkel α wie beim Knotenblech des Vorversuches der Trajektorienzeichnung entnommen werden.

Zur Dimensionierung gelten demnach auch hier die dortigen Formeln. Es ist für den oberen Gurtrand:

$$\sigma_0 = \frac{P}{F} \pm \frac{M_s}{W},$$

für den unteren Knotenblechrand:

$$\sigma_0 = \left(\frac{P}{F} \pm \frac{M_s}{W}\right) \frac{1}{\cos^2 \gamma}.$$

Für F und W kommt der Querschnitt durch den Knotenpunkt und für M_s dessen Schwerpunkt in Betracht.

Wirken auf den Knotenpunkt außer den Gurtkräften noch Einspannungsmomente, äußere Kräfte und die Pfostenkräfte, dann ist die Ermittlung des Trajektorienverlaufes nur mittels Rechnung möglich. Es müssen alle Anschlußniete und möglichst die Nietkräfte selbst sowie die Randspannungen bekannt sein, um einigermaßen richtige Kraftfelder zu erhalten, Fig. 43. Zur Berechnung der Hauptspannungen ist die Verwendung des Neigungswinkels α zu ungenau, man muß so versuchen, außer σ_α und τ_α des senkrechten Schnittes das $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ zu bestimmen. Wie aus der Fig. 75 hervorgeht, kann für einen senkrechten Schnitt auch hier eine geradlinige Verteilung der Normalspannungen angenommen werden, währenddem die Schubspannungen sich fast gleichmäßig über den Querschnitt des Knotenbleches verteilen. Die $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ werden näherungsweise so bestimmt, daß nach Abb. 37 zwei senkrechte Schnitte im Abstand b gelegt werden und ein wagerechter Schnitt an der Stelle, deren Normalspannung man ermitteln will. Da die Verteilung der Scherspannungen in den senkrechten Schnitten näherungsweise bekannt ist, so kann hieraus das

$\sigma_{\alpha + \pi/2}$ bei gleichmäßiger Verteilung über die Strecke b berechnet werden. Werden die beiden Schnitte so gelegt, daß in den Ausschnitt Pfostennietkräfte hineinkommen, so sind diese als äußere Kräfte einzuführen. In den nachfolgenden Formeln für $\sigma_{\alpha + \pi/2}$ sind die verschiedenen Zonen berücksichtigt.

Aus den in Abb. 37 eingeschriebenen Bezeichnungen wird für einen senkrechten Schnitt

$$\sigma_\alpha = \frac{P}{F} \pm \frac{M_s \eta}{J}$$

$$\tau_\alpha = \frac{Q}{F_{\text{Stehbl}}}$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sigma_{\alpha + \pi/2} = \frac{[Q' - p b_2] h_2}{[h + s] b d} - \frac{[Q' - p b_1] h_1}{h b d} & \text{für Zone außerhalb des Pfostens,} \\ \sigma_{\alpha + \pi/2} = - \frac{p h_1}{d h} & \text{für Zone zwischen den Pfostennietreihen,} \\ \sigma_{\alpha + \pi/2} = - \frac{p}{d} \frac{h_1}{h} + \frac{P h_1}{2 h b d} - \frac{n N}{b d} & \text{für Zone in den Nietreihen.} \end{array} \right.$$

wenn außer den üblichen Bezeichnungen

N = Nietkraft,
n = Zahl der abgeschnittenen Niete
d = Knotenblechdicke

bedeutet.

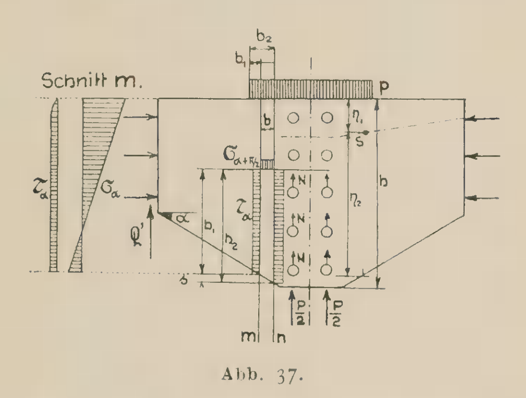


Abb. 37.

Aus diesen Werten kann nach Gl. 26 die Hauptspannung und deren Richtung für jedes Element näherungsweise bestimmt werden. Am wenigsten genau ergeben sich die Werte im unteren Teil des Knotenbleches, weil die σ_α nicht mehr obigem Gesetze gehorchen. Die Nietkräfte N werden am besten ohne Berücksichtigung der unmittelbaren Uebertragung der äußeren Kraft auf den Pfosten berechnet.

Für die Wahl der Abmessungen kommt nur der obere Gurt- und Knotenblechrand in Betracht, dessen Spannung fast genau dem theoretischen Werte entspricht.

Zusammenfassend kann bei der Berechnung der Spannungszustände in Knotenblechen von Type 3 *A* gesagt werden, daß die gewöhnlichen Berechnungsverfahren mit ebenbleibenden Querschnitten unter Berücksichtigung der gegebenen Belastungszustände gute Näherungsergebnisse liefern.

c) Knotenblech nach Type 4 *A*.

Nach Abb. 38 berechnet man näherungsweise die Spannungen in den Schnitten senkrecht zu den Diagonalanschlüssen so, daß man ein Knotenblech nach der Form der Vorversuche mit 30° geneigten Rändern zugrunde legt und

eine gleichmäßige Spannungsverteilung annimmt.[1]) Diese Annahme gründet sich auf die Ergebnisse, die in den Figuren 25 und 32 dargestellt sind. Es sind hierbei noch die Uebereinanderlagerungen der Spannungen aus angrenzenden Stabkräften herrührend zu berücksichtigen. Bei seitlichen Anschlußwinkeln kann deren Breite zugerechnet werden, sofern sie genügend angeschlossen sind.

Zur Bestimmung der Spannungszustände in den Mittelpartien des Knotenbleches können außer den durch Messung bestimmten Verteilungen der Normal- und Schubspannungen für senkrechte Schnitte auch die unschwer zu zeichnenden Trajektorienlinien mitbenutzt werden. Die Versuche ergeben, daß die Schubspannungen in diesen Schnitten zwischen Diagonalende und Pfosten nur wenig von der theoretischen Parabel abweichen, während die Normalspannungen in bedeutendem Maße, besonders auf der Höhe der Diagonalenden, von der geradlinigen Begrenzungslinie abgehen.

Die Randspannungen sowie die allgemeine Spannungsverteilung über senkrechte Querschnitte ergeben sich genügend genau unter Zugrundelegung des geradlinigen Spannungsverlaufes, sofern die M_s-Momente unter Berücksichtigung der Nebenspannungsmomente verwendet werden. Die für die Abmessungen des Knotenbleches zu bestimmenden σ_{max} treten im Schnitt durch die Pfostenanschlußnietreihe auf, entweder am unteren Gurtrand oder in der Höhe der Enden der Diagonalanschlüsse. Während im ersten Falle die nach obigen Angaben zu bestimmende Randspannung in Frage kommt, wird

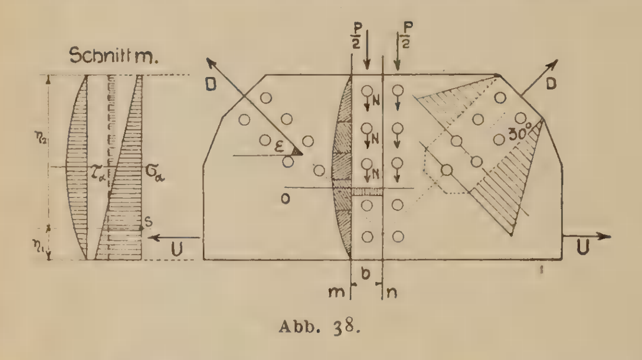


Abb. 38.

im zweiten Falle am einfachsten eine völlig gleichmäßige Verteilung der Normalspannungen angenommen, deren Größe mit der größten aus der parabelförmigen Verteilung sich ergebenden Schubspannung kombiniert wird. Durch diese Annahme wird der vermehrten Kraftaufnahme des Knotenbleches zum Teil Rechnung getragen, indem die Normalspannung in Knotenblechmitte, d. h. da, wo die größte Scherspannung ist, gegenüber dem vorigen Spannungszustande wächst.

In diesem am meisten gefährdeten Schnitt spielt bei Pfostenbelastung auch das $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ eine Rolle. Es nimmt am belasteten Nietlochrand den Wert des Lochleibungsdruckes an und am unbelasteten Rand wird es null. Wenn wir die $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ als Funktion der Ordinaten im senkrechten Schnitt zwischen zwei Nieten darstellen, so sind die vorgehend bekannt gegebenen Werte als Grenzbedingungen anzusehen. Ueber den Verlauf der Kurve zwischen diesen beiden Grenzen gibt der durch die 3 Schnitte m, n, o begrenzte obere Ausschnitt, Abb. 38, näherungsweise Aufschluß. Infolge Symmetrie ist im Schnitt n keine Schubspannung vorhanden. Das $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ im Schnitt O hat sich daher außer nach den

[1]) Angesichts der auf S. 85 in der Anmerkung angeführten Versuchsergebnisse ist es zweckmäßig, der gesteigerten Spannung zwischen den Nietreihen noch besonders Rechnung zu tragen.

Nietkräften N nur nach den τ_α im Schnitt m zu richten. Wird nun die Scherspannungsfläche so eingeteilt, daß jeder Flächenteil der nebenan wirkenden Nietkraft gleich ist, so geben die Trennungsfugen diejenigen wagerechten Schnitte an, deren mittleres $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ über die Strecke b null ist. Diese Grenzlinien teilen demnach den Knotenblechteil zwischen zwei Pfostennieten in eine obere Zone, deren mittlere $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ über die Strecke b für wagrechte Schnitte negativ sind, und in eine untere Zone, in der sie positiv sind.

Zum gleichen Engebnis über den Verlauf der $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ längs des senkrechten Schnittes durch die Pfostenniete kommen wir, wenn wir die Schnittwinkel der Zugtrajektorien mit der Senkrechten berücksichtigen. Wie aus Fig. 23 hervorgeht, schneiden sie die Schnittlinie innerhalb eines durch zwei Nietlöcher begrenzten Feldes unter einem fast konstanten Winkel, der nur in der Nähe der Nietlöcher größer wird und im Grenzfall 90° annimmt. Nach früherem wird

$$\sigma_{\alpha+\pi/2} = \frac{\sigma_\alpha \operatorname{tg} 2\alpha - 2\tau_\alpha}{\operatorname{tg} 2\alpha} = \sigma_\alpha - \frac{2\tau_\alpha}{\operatorname{tg} 2\alpha}.$$

Je nach der Einführung der in Fig. 24 Schnitt F_a gezeichneten Werte σ_α, τ_α und $\operatorname{tg} 2\alpha$ als Funktionen von x, d. h. der veränderlichen Ordinate des senkrechten Schnittes, wird auch die Spannung $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ eine Funktion von x, die an den Grenzpunkten den Wert σ_l bezw. null annimmt. Das Vorzeichen von τ_α ist positiv und ändert sich längs der ganzen Knotenblechhöhe nicht, während σ_α in den oberen Knotenblechteilen negativ ist. Soweit nun σ_α negativ bleibt, ist auch $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ negativ; ist hingegen σ_α positiv und groß, währenddem τ_α klein und $\operatorname{tg} 2\alpha$ seinen allgemeinen Wert beibehält, so kann von einem gewissen Punkt ab das $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ positive Werte annehmen. Es zeigt sich so, daß die durch die örtlich wirkenden Nietkräfte erzeugten großen Druckspannungen rasch abgebaut werden.

Als allgemein gefährdete Zone ist der belastete Lochrand im Bereich des gezogenen Gurtstehbleches zu betrachten, besonders dann, wenn die Dehnung als Grundlage für die Wahl der Abmessungen angesehen wird, indem das Material in wagerechter Richtung stark gezogen und in senkrechter stark gedrückt wird. Es ist daher gerade in dieser Hinsicht der über das Gurtstehblech auskragende Knotenblechteil vorteilhaft, indem er ermöglicht, durch eine entsprechende Nietzahl den Lochleibungsdruck herabzumindern, so daß im gezogenen Gurtteil bereits ein Teil der Kraft abgebaut ist. Zur weiteren Verminderung der Beanspruchung in den gefährdeten Punkten bei großen Pfostenkräften trägt die bereits erwähnte Durchführung der Stehblechlaschen bei, indem dadurch Zugspannung und Lochleibungsdruck vermindert werden.

Weitere gefährdete Stellen kommen in der Mitte zwischen zwei Pfostennieten vor, weil hier außer der Normalspannung die größte Scherspannung des senkrechten Schnittes auftritt. Die $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ hingegen können an diesen Stellen nicht mehr große Werte annehmen, weil sie nach vorgehenden Angaben nahe an der Grenze des Spannungswechsels sind.

In Formeln ausgedrückt, würde sich beim Knotenblech 4 A unter Vernachlässigung der Schubkräfte aus Nebenspannungen nach Abb. 38 ergeben:

für die Randspannungen
$$\sigma_\alpha = \frac{D \cos \varepsilon + U}{F} \pm \frac{M_s \eta}{J}$$

Spannungen in der mittleren Zone
$$\begin{cases} \sigma_\alpha = \dfrac{D \cos \varepsilon + U}{F} \\ \tau_{\max} = \dfrac{3}{2} \dfrac{D \sin \varepsilon}{F_{\text{Stebbl.}}}, \end{cases}$$

wobei die beiden letzten Werte nach Gl. (26) vereinigt eine Knotenblechhaupt-

spannung ergeben können, die größer ist als die Randspannungen. Hierbei ist vorauszusetzen, daß versucht wird, bei großen Pfostenkräften den Lochleibungsdruck niedrig zu halten. Für F und J kommt der Querschnitt durch den Knotenpunkt und für M_r dessen Schwerpunktsmoment in Betracht. Für die Querkraft ist bei $F_{Stehbl.}$ bei Nietlöchern die Schwächung zu berücksichtigen. Im senkrechten Schnitt durch die Pfostenanschlußnietreihe kann von der Querkraft ¹/₄ Pfostenkraft abgezogen werden. Die Wirkung des $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ wird nach bekanntgegebenen Umständen vernachlässigt; um genauere Formeln für seine Berechnung angeben zu können, sind besondere Untersuchungen in den durch die Anschlüsse verdeckten Knotenblechteilen auszuführen. Dies ist auch der Fall bei unsymmetrischer Belastung, wo die Querkraft zwischen den beiden Pfostenanschlußnietreihen nicht null ist. Bei seitlich an durchgehende oder zu laschende Gurtungen angebrachten Knotenblechen ist die Einwirkung der $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ im Bereich des Stehbleches bedeutend geringer, weil der Lochleibungsdruck infolge mehrerer Blechstärken stark vermindert wird, sofern der Pfostenanschluß durch doppelschnittige Niete erfolgt. Das gleiche ist der Fall bei gedrückten Gurtstäben und gezogenen Pfosten, indem bei gleichzeitiger Wirkung eines negativen σ_α und $\sigma_{\alpha+\pi/2}$ die Längenänderung vermindert wird. Hier wird die Wechselwirkung in den über das Gurtstehblech auskragenden Knotenblechteil verlegt.

d) Knotenblech nach Type 4 *B*.

Beim Knotenblech 4 *B* kommen für den Teil mit dem Diagonalanschluß die gleichen Angaben und Formeln zur Berechnung der Spannungen und zur Konstruktion in Betracht, wie sie bei Knotenblech 4 *A* gemacht wurden, indem die gemessenen Spannungsverteilungen sich nur wenig von den früheren unterscheiden. Die Scherspannungsflächen der senkrechten Schnitte zwischen Pfosten und Diagonale sind auch hier parabelförmig. Als gefährdete Querschnitte sind die Schnitte durch die beiden Pfostenanschlußnieten zu betrachten, Fig. 60. Im einen auf der Seite der Diagonale ist die Scherkraft

$$Q = D \sin \varepsilon - \frac{P}{4} = \frac{3\,P}{4},$$

wenn mit P die Pfostenkraft bezeichnet wird, währenddem für den andern Schnitt nur die Scherkraft $Q = \frac{P}{4}$ in Betracht kommt, sofern die aus den Nebenspannungen entstehenden Querkräfte vernachlässigt werden. In beiden Schnitten kommen, besonders im unteren Teil, neben großen positiven σ_α noch große Lochleibungsdrücke hinzu. Es ist somit auch hier eine entsprechende Verstärkung des Knotenbleches bei großen Pfostenkräften am Platze. Für die Bemessung sind die Randspannungen und die Spannungen in Knotenblechmitte nach den bei Knotenblech 4 *A* angegebenen Formeln zu bestimmen. Die Größe der Normalspannungen in den wagerechten Schnitten der verdeckten Knotenblechteile ist auch in diesem Falle durch weitere Untersuchungen zu klären.

4. Bestimmung des ungünstigen Belastungszustandes für die Bemessung der Knotenbleche.

Zur Darstellung des näherungsweisen Spannungsverlaufes in senkrechten und wagerechten Schnitten in einem bestimmten Belastungsfall werden vorerst die Stabkräfte und die Einspannungsmomente nach dem in Kapitel VI angegebenen Verfahren der Steifigkeitsstrecken berechnet und hernach mit Hilfe der angeführten Formeln die Spannungsbilder für die in das Gurtstehblech einge-

fügten Knotenblechbauarten bestimmt. Die Kurven der Spannungsverteilung können der Wirklichkeit noch besser angepaßt werden, wenn man die berechneten Spannungslinien entsprechend den in den Versuchen angegebenen Abweichungen, unter Berücksichtigung der Gleichgewichtsbedingungen, abändert und das nach den bekannt gegebenen Regeln bestimmte Trajektoriennetz zu Rate zieht.

Lassen wir nun eine lotrechte Einzellast 1 von Knotenpunkt zu Knotenpunkt der belasteten Gurtung wandern, so können wir für einen jeden Belastungsfall unter Berücksichtigung der notwendigen Veränderungen der Steifigkeitsstrecken für ein bestimmtes Knotenblech die angreifenden Stabkräfte und Einspannmomente, und ferner das Kraftfeld und den Spannungsverlauf für maßgebend erscheinende Schnitte ermitteln. — Die Elemente eines Knotenbleches sind zu unterscheiden:

a) in solche, bei denen sich die Hauptspannungsrichtungen infolge veränderlicher Belastung nicht oder nur ganz unbedeutend ändern, wie dies z. B. bei Randpunkten bezw. Punkten nahe am Rande der Fall ist, auf die keine oder stets nur in gleicher Richtung wirkende äußere Kräfte einwirken (Lochrand);

b) in solche, bei denen sich die Hauptspannungsrichtungen infolge veränderlicher Belastung stark ändern.

Für die Elemente a) können aus den vorgehend einzeln behandelten Belastungsfällen Einflußlinien unmittelbar bestimmt und daraus die Höchstwerte ermittelt werden. Streng gelten diese Einflußlinien nur dann, solange im ganzen Knotenblech keine Beanspruchungen über der Proportionalitätsgrenze eintreten und keine Veränderungen in den Hauptspannungsrichtungen des betreffenden Elementes vorkommen.

Für die Elemente b) ist es nicht mehr möglich, durch die gewöhnlichen Einflußlinien die Grenzwerte zu bestimmen. Es muß hier aus der gemeinsamen Verwendung der Einflußlinien von σ_α, τ_α, $\sigma_{\alpha + \pi/2}$ versucht werden, einen Belastungszustand derart zu finden, daß, je nach dem Bemessungsverfahren, die erforderlichen Grenzwerte der Spannungen sich ergeben. Aus diesen Angaben ergibt sich, daß für die Punkte eines jeden Schnittes durch ein Knotenblech die maßgebenden Belastungsfälle verschieden sein können.

Für die Bemessung des Knotenbleches kommen nur die am meisten bedrohten Zonen in Betracht. Als solche sind bei allen vorgehend behandelten Typen in den Schnitten durch die Pfostenanschlußnietreihen die Randzonen an den Außenkanten, bezw. am Lochrand des äußersten Nietloches zu betrachten. Die zugehörigen Elementpunkte können unter a) gezählt werden und es kann so für diese Zone die gewöhnliche Einflußlinie verwendet werden. Ganz ähnliche Verhältnisse zeigen sich auch in der Gefahrzone zwischen den zwei Anschlußnietreihen der Diagonalen, indem dort die Trajektorien gezwungen sind, vorherrschend die Richtung normal und parallel zur Diagonalachse anzunehmen. Auch der größte Teil der Elemente der Gurt- und Fachwerkstäbe kann, was hier nur kurz erwähnt werden soll, unter a) eingereiht werden, indem die Schubspannungen meist eine untergeordnete Rolle spielen. Hier ergeben sich die Randspannungen am einfachsten aus den Einflußlinien für die Kernpunkte senkrecht zur Stabachse gerichteter Schnitte. Es ist zu vermuten, daß die reduzierten Randspannungen in den abstehenden Schenkeln der Füllungsgliedern lediglich von der Ausbildung der Querschnitte herrühren, indem die einzelnen Glieder nur durch Futter in den Drittelspunkten verbunden sind und dadurch die seitliche Deformation aus der Ebene des Hauptträgers ungehindert erfolgen kann.

Als weitere Gefahrzone sind bei den Knotenblechtypen 4 *A* und 4 *B* diejenigen im Mittelteil der Knotenbleche im Bereich des Pfostens, besonders im Schnitt durch die Pfostennietreihe, ferner die im Bereich des Diagonalendes zu betrachten. Die Elemente dieser Zonen sind, sofern es sich nicht um Randelemente handelt, unter die Klasse b) einzureihen und es kommen zur Bestimmung der Grenzwerte die dort ausgeführten Angaben in Betracht.

5. Einwirkung der Nietkopfpressungen auf die Sannnungsverteilung in Knotenblechen.

Die durch die Nietköpfe ausgeübten Drücke, besonders hervorgerufen durch die Schaftverkürzung bei der Abkühlung, bewirken ein Anpressen der zu befestigenden Anschlußteile an das Knotenblech. Je nach den hierbei vorkommenden Drücken erleiden Anschlußteile und Knotenblech örtliche Ueberbeanspruchungen, die bewirken, daß die Nietkopfpressungen am Knotenblech nicht über die ganze Fläche des Anschlusses gleichmäßig verteilt sind; es können sogar nach Prof. Baumann, Forschungsheft Nr. 252, bei großen Drücken Wölbungen in den Anschlußblechen eintreten, wodurch an diesen Stellen der Druck aus Nietkopfpressungen vollständig verschwindet. Im allgemeinen kann gesagt werden, daß sich die Nietkopfpressungen am Knotenblech hauptsächlich um die Nietlöcher herum ansammeln, und zwar umsomehr, je größer der ausgeübte Druck beim Nieten war.

Die Einwirkung der Nietkopfpressungen auf die Spannungsverteilung an Knotenblechen soll an folgenden drei Fällen untersucht werden.

a) Das Knotenblech wird gespannt, ohne daß der zu betrachtende Nietanschluß die Ursache ist. In diesem Falle verteilen sich die Nietkopfpressungen, sofern von kleinen Verformungen infolge Längenänderungen im Knotenblech abgesehen wird, gleichmäßig um die Nietlöcher herum. Es tritt nun die Frage auf, welchen Einfluß der vernietete Anschlußteil auf die Spannungsverteilung im Knotenblech ausübt. Man hat es hier mit einem Knotenblech zu tun, das durch die Anschlußstäbe örtlich verstärkt wird, indem vermittels der durch die Nietkopfpressungen entstehenden Reibungskräfte Kraftlinien aus dem Knotenblech in diese Anschlußteile übergehen. Daß dies der Fall ist, beweisen die Versuche von Rudeloff (Versuche im Eisenbau, Heft 1, Fig. 6), wo die gemessenen Dehnungen am Rande des Versuchsstückes bei beiderseitig aufgenieteten Laschenstücken etwa 10 vH geringer sind, als bei leeren Nietlöchern. Es üben daher diese aufgenieteten Teile einen günstigen Einfluß auf den Spannungszustand im Knotenblech aus, indem sie gerade an den Lochrändern zur Wirkung kommen, wo eine bedeutende Steigerung der Spannungen sich zeigt. Die Größe dieser entlastenden Wirkung ist abhängig von der Stärke der Pressungen, von der Größe der Zone, über welche die Reibungskräfte sich verteilen, von dem Verhalten der Farbschicht, die zwischen Knotenblech und Laschen angebracht worden ist und im weiteren von der Querdehnung des gespannten Knotenbleches.

b) Geht die Beanspruchung des Knotenbleches vom betrachteten Stab oder Laschenanschluß selbst aus, so verteilen sich die Nietkopfpressungen infolge der in Kap. III Abschn. 5 angegebenen Verformung der Nietschäfte und Anschlußteile, nicht mehr gleichmäßig um das Nietloch herum, sondern sie treten vorherrschend vor dem gedrückten Lochrand des Knotenbleches auf. Die durch die vernieteten Anschlußteile erzeugten Verstärkungen des Knotenbleches werden demnach in der Richtung der Kraft vor die Niet-

löcher geschoben, so daß von einer wesentlichen Entlastung der seitlich zur Kraftrichtung liegenden Lochränder, wo die größten Beanspruchungen auftreten, nicht mehr die Rede sein kann. Dies ist umsoweniger der Fall, da die Laschenteile selbst starken Beanspruchungen ausgesetzt sind. Es kann sich insofern eine günstigere Spannungsverteilung im Knotenblech ergeben, als der Abbau der Stab- und Laschenkräfte nicht in der engbegrenzten Form vor sich geht, wie dies durch die Nietschäfte allein geschieht.

c) Tritt der Fall ein, daß neben der unter b) erzeugten Knotenblechbeanspruchung noch eine Spannung des Knotenbleches durch andere Anschlüsse erfolgt, wie dies z. B. im Schnitt F_a vom Knotenblech 4 A im Belastungsfall 1 vorkommt, dann können die durch die Nietkopfpressungen erzeugten örtlichen Verstärkungen der Knotenbleche den von diesen anderen Anschlüssen herstammenden Spannungsverlauf günstiger gestalten. Im erwähnten Schnitt F_a Fig. 24 kann daher in der Zugzone des Knotenbleches auf der unteren Seite der Pfostennietlöcher eine geringere Zugbeanspruchung auftreten, als dies in der mutmaßlichen Zeichnung der Fall ist.

Es sind in den vorhehenden Untersuchungen alle die erwähnten, den Spannungsverlauf in Knotenblechen günstiger gestaltenden Umstände vernachlässigt worden, weil sie zu sehr von der praktischen Ausführung der Konstruktionen abhängen und nicht immer mit absoluter Sicherheit eintreten.

VIII. Zusammenfassung.

Es wird versucht, an Hand von Dehnungsmessungen einen Einblick in das Arbeiten der Knotenbleche zu geben und durch verbesserte Berechnungsverfahren diesen so ermittelten Spannungen nahe zu kommen.

Zu diesem Zweck werden zuerst theoretische Untersuchungen angestellt über die Ermittlung der Hauptspannungen und Trajektorien aus den Dehnungsmessungen und zu ihrer Ergänzung in verdeckten Knotenblechteilen, ferner über die Nietverformung und ihre Einwirkung auf die Spannungsverteilung.

An Hand von Vorversuchen wird die Spannungsverteilung und der Trajektorienverlauf an einem symmetrisch zur Kraftachse gebauten Knotenblech, das einen Zugstab mit einer biegungsfesten Gurtung verbindet, festgestellt und auch der Kraftabbau an diesem Stab untersucht. Im weiteren werden die mutmaßlichen Verhältniswerte zwischen mittlerer Spannung und höchster Lochrandspannung bestimmt. Die Zusammenfassung der Vorversuchsergebnisse ist auf Seite 41 zu finden.

Bei den Hauptversuchen werden Messungen an drei verschiedenen Knotenblecharten in verschiedenen Belastungsfällen durchgeführt und zeichnerisch in Tafeln zusammengestellt. Es werden die wechselnden Kraftfelder der Knotenbleche und die Spannungsverteilungen für verschieden gerichtete Schnitte sowie ihre zum Teil durch Rechnung bestimmten Ergänzungen an verdeckten Knotenblechteilen gezeigt. Es ergeben sich meist leicht darstellbare Zusammenhänge einzelner Nietgruppen durch Zug- und Drucklinien, die eine klare Vorstellung vom Verlauf des Kraftflusses geben und wesentlich zur konstruktiven Ausbildung der Knotenpunkte beitragen. Zur Bestimmung der Stabkräfte und Einspannungsmomente werden die Abmessungen auch auf die Anschlußstäbe ausgedehnt. Aus der Bestimmung der Spannungsverteilung in verschiedenen Querschnitten durch Knotenpunkte und Fachwerkstäbe geht hervor, daß diese nicht geradlinig ist, sondern sich den örtlich angreifenden Kräften anpaßt.

Im weiteren werden Durchbiegungs- und Drehwinkelmessungen ausgeführt zur Nachprüfung der Berechnung der Knotendrehwinkel und Nebenspannungsmomente. Die rechnerische Erfassung dieser Meßergebnisse führt zu einem Rechenverfahren, bei dem die Form und Elastizität der Knotenbleche näherungsweise berücksichtigt werden kann und dessen Ergebnisse mit den wirklich vorkommenden Werten befriedigend übereinstimmen. Durchbiegungen, Stabkräfte und Nebenspannungsmomente stimmen in den meisten Fällen sehr gut überein, ebenso kann aus den Neigungsmessungen geschlossen werden, daß die rechnerisch bestimmten Knotendrehwinkel des Knotenblechkernes richtig sind.

Das erwähnte Verfahren, das das elastische Verhalten der Knotenbleche zu berücksichtigen sucht, dient zum Vergleich von gerechneten und gemessenen Stabkräften und Einspannungsmomenten und zur näherungsweisen Darstellung des Spannungsverlaufes in Schnitten durch Knotenbleche und Fachwerkstäbe für einen bestimmten Belastungszustand.

Um der Praxis einige Anhaltspunkte aus den Versuchsergebnissen zu geben, werden im letzten Abschnitt Angaben über die konstruktive Durchbildung von Knotenpunkten und ihre Berechnung in Anlehnung an bisherige Verfahren gegeben. Da jedoch die Spannungen in den am meisten gefährdeten Schnitten durch unmittelbare Messungen nicht bestimmt werden konnten, so sind in dieser Hinsicht weitere Versuche notwendig, um die Formeln für die Berechnung der Abmessungen noch besser der Wirklichkeit anzupassen und die Bestimmung der Belastungszustände für die zu ermittelnden Grenzwerte in den Gefahrzonen einfach zu gestalten. Im Grunde genommen, bestätigen die Versuche unter Voraussetzung der Richtigkeit der in Kap. VII, Abschnitt 2a, gemachten Annahmen die Zulässigkeit der bisherigen einfachen Rechnungsverfahren.

Alle in dieser Arbeit gemachten Angaben beziehen sich auf drei festgelegte, in das Gurtstehblech eines einwandigen Probefachwerkträgers eingefügte Knotenblechbauarten. Die Spannungsverhältnisse in Knotenblechen an mehrteiligen Gurtungen und Füllungsgliedern wurden nicht untersucht.

IX. Verzeichnis der in der ungekürzten Arbeit enthaltenen Untersuchungen.

Mappe 1. a) Programm der Arbeit. 14 S. Aktformat.
- b) Theoretische Ermittlung der Spannungen aus den Dehnungen. 25 S.
- c) Theoretische Ermittlung der Nietverformung. 16 S.

Mappe 2. a) Statische Berechnung des Probeträgers. 36 S.
- b) Bestimmung der Nebenspannungen an Fachwerken unter Berücksichtigung der Knotenblechform. 18 S.
- c) Verdrehungen und Durchbiegungen des Probeträgers. 14 S.

Mappe 3. a) Pläne des Probeträgers. 16 S.
- b) Belastungsvorrichtung und Installation des Probeträgers. 8 S.
- c) Meßapparate. 6 S.
- d) Konstruktion der Elektromagnete.
- e) Photographien. 16 Stück.

Mappe 4. a) Plan und Berechnung des Probekörpers der Vorversuche. 7 S.
- b) Ermittlung der Druckfigureu am Nietloch. 17 S.
- c) Versuche mit dem Probekörper und ihre Ergebnisse. 36 S.

Mappe 5. Spannungen am Knotenblech 4*A* des Probeträgers. 107 S.

I. Allgemeines.

1. Allgemeine Uebersicht über das Knotenblech.

II. Belastungsfall 1.

1. Zeichnerische Darstellung der Dehnungen.
2. Berechnung der Hauptspannungen und Spannungskomponenten.
3. Berechnung der Spannungen an den Anschlußgliedern des Knotenbleches.
4. Darstellung des Spannungsverlaufes an den Füllungsgliedern.
5. Stabkräfte und Momente an den Füllungsgliedern.
6. Darstellung des Spannungsverlaufes an den Gurtstäben.
7. Hauptspannungslinien zeichnerisch dargestellt (Normal- und Schubspannungen).
8. Zeichnung der Spannungen in den senkrechten und wagerechten Schnitten.
9. Berechnung der Normal- und Querkräfte in diesen Schnitten.
10. Zeichnung der Spannungen in den Diagonalschnitten.
11. Berechnung der Normal- und Querkräfte in diesen Schnitten.
12. Gleichgewicht einzelner Blechelemente und Blechteile.
13. Zusammenstellung der Momente und Kräfte am Knotenpunkt.
14. Spannungsvergleiche zwischen Theorie und Messung.

III. Belastungsfall 2.

Wie voriges Verzeichnis.

Mappe 6. Spannungen am Knotenblech 3*A*. 41 S.
  I. Allgemeines.
  II. Belastungsfall 1.
  III. Belastungsfall 2.

Mappe 7. Spannungen am Knotenblech 4*A'*. 95 S.
  Verzeichnis wie vorgehendes.

Mappe 8. Spannungen am Knotenblech 3*A'*. 55 S.
  Verzeichnis wie vorgehendes.

Mappe 9. Spannungen am Knotenblech 4*B*. 47 S.
  I. Allgemeines.
  II. Belastungsfall 1.

Mappe 10. Originalmessungen, gegen 8000 zu je 4 Wiederholungen.
1. Messungen der Vorproben.
2. Messungen zur Ermittlung der Druckfiguren.
3. Abmessungen an den Querschnitten des Probeträgers.
4. Drehwinkel und Durchbiegungsmessungen.
5. Messungen am Knotenblech 4*A*.
6. Messungen am Knotenblech 3*A*.
7. Messungen am Knotenblech 4*A'*.
8. Messungen am Knotenblech 3*A'*.

Mappe 11. Druckfertige gekürzte Arbeit.

Lebenslauf.

Ich bin am 21. Juni 1890 in Zürich geboren als Sohn des Gottlieb Wyss von Dulliken, Kt. Solothurn und der Verena Lang von Baden, Kt. Aargau und besuchte die Gemeinde- und Bezirksschule in Olten sowie die Kantonschule in Aarau, von der ich das Reifezeugnis erhielt. Danach studierte ich an der eidgenössischen technischen Hochschule in Zürich und erwarb dort 1913 das Diplom als Bauingenieur. Praktisch tätig war ich bei ersten Eisenbaufirmen der Schweiz und Deutschlands, sowie als Ingenieur der S. B. B. bei den Brückenverstärkungen der Gotthardbahn. Die Promotionsarbeit habe ich im Winter 1919 begonnen und im Herbst 1921 beendet. Die mündliche Doktorprüfung habe ich am 18. Dezember 1921 bestanden. Seit Neujahr 1922 bin ich 1. Assistent und Konstruktionsingenieur beim Lehrstuhl für Statik und Brückenbau an der Technischen Hochschule in Danzig bei Herrn Geheimrat Prof. Dr.-Ing. Krohn.

Lithomount
Pamphlet
Binder
Gaylord Bros.
Makers
Syracuse, N. Y.
PAT. JAN 21, 1908

UNIVERSITY OF ILLINOIS-URBANA
3 0112 099416296